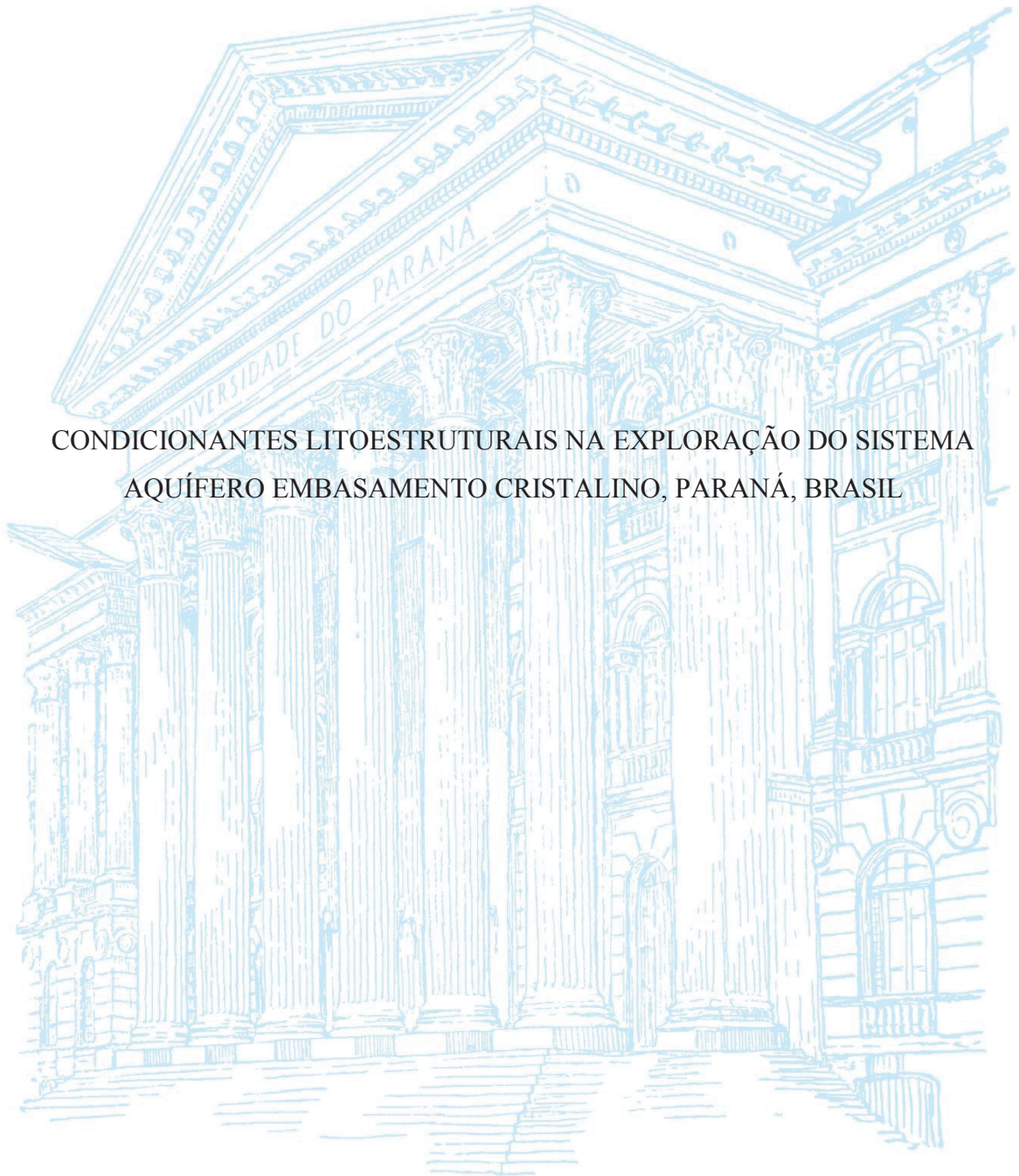


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CÁSSIO DE ALMEIDA PIRES

CONDICIONANTES LITOESTRUTURAIS NA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA
AQUÍFERO EMBASAMENTO CRISTALINO, PARANÁ, BRASIL



CURITIBA

2020

CÁSSIO DE ALMEIDA PIRES

CONDICIONANTES LITOESTRUTURAIS NA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA
AQUÍFERO EMBASAMENTO CRISTALINO, PARANÁ, BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geologia, no Curso
de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências
da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde (UFPR)

Coorientador:

Dr. Oderson Antônio de Souza Filho (CPRM)

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P667c Pires, Cássio de Almeida
 Condicionantes litoestruturais na exploração do sistema aquífero embasamento cristalino,
 Paraná, Brasil [recurso eletrônico] Cássio de Almeida Pires. – Curitiba, 2020.

 Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-
 Graduação em Geologia, 2020.

 Orientador: Gustavo Barbosa Athayde.
 Coorientador: Oderson Antônio de Souza Filho.

 1. Aquíferos. 2. Bacias hidrográficas - Brasil. 3. Hidrografia. I. Universidade Federal do
 Paraná. II. Athayde, Gustavo Barbosa. III. Souza Filho, Oderson Antônio de. IV. Título.

CDD: 551.49

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CÁSSIO DE ALMEIDA PIRES** intitulada: **CONDICIONANTES LITOESTRUTURAIS NA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO EMBASAMENTO CRISTALINO, PARANÁ, BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 08 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica

09/06/2020 18:20:37.0

GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/06/2020 15:05:18.0

PEDRO ANTONIO ROEHE REGINATO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

09/06/2020 23:07:10.0

EDUARDO SALAMUNI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 43212

Para autenticar este documento/assinatura, acesse
<https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 43212.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e à Pós-Graduação em Geologia da UFPR pela oportunidade da realização desse projeto de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo.

Aos meus orientadores e mentores Gustavo Barbosa Athayde e Oderson Antônio de Souza Filho, os quais foram fundamentais nessa trajetória acadêmica e de formação. Agradeço demais por terem tido paciência com todas as minhas ideias mirabolantes, minhas dúvidas e minhas dificuldades.

Ao Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) pela infraestrutura que me permitiu trabalhar, pelas geoconversas com os colegas e diversos geocafezinhos.

Ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) pelas inúmeras conversas sobre geofísica com os colegas e suporte na utilização dos programas.

Ao Capítulo Estudantil SEG de Geofísica da UFPR pela construção coletiva das atividades e discussões envolvendo a divulgação das geociências.

Ao LabGeol, sala dxs pós-graduandxs em geologia da UFPR, pelo espaço para trabalhar, cafezinho e discussões com os colegas.

Ao Serviço Geológico do Brasil pelo apoio na coorientação desse trabalho e disponibilidade gratuita dos dados aerogeofísicos.

E um agradecimento especial aos familiares e às muitas amigas e amigos não mencionadas e não mencionados diretamente aqui, mas que sabem que de alguma forma exerceram um papel mais do que fundamental, exerceram um papel sem o qual eu não teria nem conseguido sair da periferia fervente do Rio de Janeiro e ido morar no friorento Paraná. Eu precisaria de mais 95 páginas para poder listar os nomes e a importância da contribuição de todxs.

Porém, há uma pessoa que deve ser mencionada: Camila de Almeida Pires, amada e querida irmã. A pessoa que mais me incentivou a estudar nessa vida. Incentivou tanto que eu duvido que ela imaginaria o tamanho da semente que ela estava plantando em mim. A vontade dela era de me ajudar a “ser alguém na vida”, agora a minha é a de ajudar a de muitas outras pessoas. E exatamente agora, escrevendo este parágrafo, derramo minhas lágrimas de felicidade por não conseguir expressar tão bem a minha eterna gratidão.

Por fim, um agradecimento à educação, para que consigamos mudar positivamente a realidade de muitas outras vidas e de muitos outros lugares.

Dedico esta pesquisa às trabalhadoras e trabalhadores desse país tão vasto e tão desigual. Em especial, às camponesas e camponeses que muito contribuíram em como eu devo retribuir cada centavo a que me foi investido por meio de bolsa de estudo, infraestrutura da universidade pública, professoras e professores, aulas etc.

Em suma, dedico ao povo brasileiro, aos movimentos sociais e à maior parte da população que não tem oportunidade ou direito a uma educação crítica e de qualidade, muitos dos quais não poderão nem ler essa dissertação, mas que de alguma maneira exerceram um papel fundamental no meu amadurecimento profissional e social.

Em breve lhes retornarei, seja no campo, ou nas favelas e comunidades.

RESUMO

Essa pesquisa teve como objetivo apontar qualitativa e quantitativamente regiões hidrogeologicamente produtivas por meio de correlações espaciais de poços tubulares e condicionantes geológicos, tais como lineamentos, hidrografia, aeromagnetometria e litologias presentes no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC), estado do Paraná, Brasil. Técnicas de aprimoramento dos dados aeromagnéticos e a escolha da escala mais adequada para a extração dos traçados são o diferencial dessa pesquisa, pois torna possível replicar em qualquer aquífero cristalino. A mediana da capacidade específica dos 224 poços tubulares analisados é 0,29 m³/h/m. Sob uma avaliação regional multi-escala (1:400.000, 1:250.000 e 1:100.000), os resultados apontaram que a melhor condição para a locação de um poço tubular está associada com a distância de até 350 m dos lineamentos, especialmente aqueles com resultados nas direções N40W, N10E e N70E. Considerando unidades hidrolitológicas, os gnaisses e os granitoides (HGM) são os mais produtivos, sobretudo onde lineamentos coincidem com estruturais regionais, tais como zonas de cisalhamento, foliações e reativações tectônicas cenozoicas. Quartzitos, granitoides (LGM), xistos, filitos e riolitos também se mostraram locais favoráveis quando próximas a alguns rios principais ou lineamentos específicos e não necessariamente coincidentes com os lineamentos regionais, alta densidade ou fraturas verticais. As áreas de intersecções dos lineamentos não serviram como parâmetro discriminatório nesta pesquisa. Para as análises hidrogeofísicas, foram traçados gradientes magnéticos orientados (GMOs) com base no filtro inclinação do sinal analítico - ISA (análise qualitativa) e estimadas as profundidades das fontes magnéticas causativas (análise semiquantitativa), calculadas por meio do espectro de potência radial. À medida que as profundidades medianas dos poços tubulares atingem 90 m da superfície, a extração dos GMOs refere-se a fontes magnéticas com medianas de até 800 m de profundidade. Essas estruturas magnéticas identificadas corroboram com lineamentos mapeados em superfície e revelam novas estruturas exploráveis não identificadas no relevo. As ferramentas de geoprocessamento aplicadas aos dados geológicos e geofísicos mostraram-se importantes em discriminar condicionantes exploratórios específicos em cada unidade hidrolitológica e, portanto, para minimizar o risco exploratório no SAEC. Para trabalhos futuros, recomenda-se analisar em escala de maior detalhe os traçados dos *trends* estruturais, reconstituir paleotensores tectônicos atuantes nos outros terrenos geológicos, além do Terreno Curitiba, e ampliar o banco de dados de poços tubulares perfurados, sobretudo nas regiões onde há pouca amostragem de informações.

Palavras-chave: Aquíferos fraturados, produtividade hídrica, lineamentos multi-escala, análise geoespacial, hidrogeofísica

ABSTRACT

This research aimed to identify qualitatively and quantitatively hydrogeologically productive regions through spatial correlations of wells and geological conditions, such as lineaments, hydrography, aeromagnetometry and different lithologies present in the Crystalline Basement Aquifer System (CBAS), state of Paraná, Brazil. Techniques for improving airborne magnetic data and the choice of the most appropriate features extraction scale are the differential of this research, as it makes it possible to replicate in any crystalline aquifer. The median specific capacity of the 224 wells analyzed is 0.29 m³/h/m. Under a multi-scale regional assessment (1:400,000, 1:250,000 and 1:100,000), the results showed that the best condition for the location of a well is associated with the distance of 350 m from the lineaments, especially those with directions N40W, N10E and N70E. Considering hydrolithological units, gneisses and granitoids (HGM) are the most productive, especially where lineaments coincide with regional structures, such as shear zones, foliations and cenozoic tectonic reactivations. Quartzites, granitoids (LGM), schists, phyllites, and rhyolites were also favorable locations when close to main rivers or specific lineaments and not necessarily coinciding with regional lineaments, high density, either vertical fractures. The areas of intersection of the lineaments did not serve as a discriminatory parameter in this research. For hydrogeophysical analyzes, oriented magnetic gradients (OMGs) were traced based on the tilt derivative filter - TDR (qualitative analysis) and the depths of the causative magnetic sources were estimated (semiquantitative analysis), calculated using the radial power spectrum. As the median depths of the water wells reach 90 m from surface, the extraction of OMGs referred to magnetic sources with median down to 800 m depth. These identified magnetic structures corroborate with surface mapped lineaments and reveal new explorable structures not identified in the relief. The geoprocessing tools applied to the geological and geophysical data proved to be important in discriminating specific exploratory conditions in each hydrolithological unit and, therefore, to minimize the exploratory risk in CBAS. For future work, it is recommended to analyze, in greater detail, the traces of structural trends, reconstruct tectonic paleotensors active in other geological terranes, in addition to the Curitiba Terrane, and expand the database of drilled water wells, especially in regions where there is little sampling of information.

Keywords: Fractured aquifers, groundwater productivity, multi-scale lineaments, geospatial analysis, hydrogeophysics

LISTA DE FIGURAS

DISSERTAÇÃO

- Figura 1 - Localização do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino – SAEC (área de estudo), poços tubulares utilizados na pesquisa e os índices de produtividade das regiões do aquífero (modificado de Brasil, 2015). As cores e valores em parêntesis de produtividade do aquífero referem-se ao padrão internacional em Struckmeier e Margat (1995) e UNESCO (1983): tipo de aquífero verde – fraturado (Fr); verde hachurado – carste (K); azul – intergranular (Gr); marrom – não aquífero; índice de produção (6) bastante improdutivo; (5) muito baixo; (4) baixo; (2) alto. 16
- Figura 2 - Ilustração de um aquífero fraturado, onde as fraturas abertas têm a maior possibilidade conter água e poços produtivos, enquanto que fraturas fechadas têm a maior possibilidade de não conter água, ocasionando poços secos, ou seja, não produtivos. Cinza: rochas cristalinas; rosa: rochas sedimentares. Fonte: Modelo ilustrativo do contexto hidrogeológico (modificado de Feitosa et al., 2008); aeronave responsável pelo levantamento geofísico (CPRM, 2011). 21
- Figura 3 - Relação entre abertura das fraturas e condutividade hidráulica (Hoek e Bray, 1981 apud Domenico e Schwartz, 1990). 22
- Figura 4 - Correlação relativamente independente entre permeabilidade e densidade de fraturas (Gale e Rouleau, 1983 apud Fernandes, 2008). 22
- Figura 5 - Reconstituição de paleostress, período provável de atuação e direções das fraturas cisalhantes e extensionais (Fernandes e Rudolph, 2001). 23
- Figura 6 – Modelo esquemático do conceito de Riacho-Fenda, no qual as drenagens podem representar fraturas subjacentes (Coriolano, 2002). 24
- Figura 7 – Diferentes planos de fraturas cisalhantes e tensionais conforme sua escala de distribuição (Ruhland, 1973). 25
- Figura 8 - Relação entre direção de lineamentos, produtividade de poços tubulares no SASG e tensores de máxima tensão tectônica obtidos por diferentes autores (Athayde, 2013). 26
- Figura 9 - Bacias hidrográficas, índices de pluviosidade e hidrografia da região do SAEC (adaptado de CPRM, 2006; ITCG, 2008; Brasil, 2015). 29
- Figura 10 - Síntese do mapa geológico da porção aflorante do embasamento da Bacia do Paraná limitado ao estado do Paraná (modificado de Basei et al. (1992), Siga Junior et al.

(1995), MINEROPAR (2006), Heilbron et al. (2008), Passarelli et al. (2018); Patias et al. (2019).	31
Figura 11 - Representação esquemática do campo dipolar magnético da Terra (Blakely, 1995).	33
Figura 12 - Sistema de coordenadas cartesianas das principais componentes do campo geomagnético, a partir de um ponto P qualquer. N - norte geográfico; D - declinação magnética; I - inclinação magnética; B - campo total (Blakely, 1995).	34
Figura 13 - Mapa de Intensidade do Campo Total do planeta Terra, sendo um dos componentes calculáveis do IGRF (BGS, 2018).	35
Figura 14 - Fluxograma geral com a síntese das etapas deste trabalho. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/analises SIG.	37
Figura 15 - Fluxograma das etapas de tratamento dos dados de produtividade hídrica associados aos lineamentos. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/analises SIG.	39
Figura 16 – Representação da interface Python - ArcGIS™ para inserção das fórmulas condicionais, cuja finalidade auxiliou nas reclassificações das direções dos lineamentos e na construção dos gráficos estatísticos de produtividade.	40
Figura 17 – Modelo esquemático dos buffers gerados a partir dos lineamentos.	41
Figura 18 - Modelo esquemático dos buffers gerados a partir das intersecções dos lineamentos.	42
Figura 19 – Modelo esquemático da relação entre as possibilidades combinatórias de sobreposição entre os lineamentos e os poços.	43
Figura 20 - Projeto Aerogeofísico 1095 Paraná - Santa Catarina, em vermelho (CPRM 2011).	44
Figura 21 – Comparação entre os dois diferentes aerolevantamentos magnéticos correspondentes à região de estudo (modificado de CPRM, 1978, 2011)	45
Figura 22 - Fluxograma das etapas do tratamento dos dados aeromagnéticos. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/analises SIG.	46
Figura 23 – Modelo esquemático para as diferentes fontes magnéticas geradas a partir do cálculo do espectro de potência medido radialmente (EPMR).	47

ARTIGO

Figure 1 - Crystalline Basement Aquifer System location (area of study), wells used in research and productivity indexes in the aquifer regions (adapted after Brasil, 2015). Aquifer's colors (saturation) and numbers in parenthesis refer to international standard in UNESCO (1983) and Struckmeier and Margat (1995): aquifer type green – fractured (Fr); hatched green – karst (K); blue – intergranular (Gr); brown – no aquifer; production index (6) fairly unproductive/no aquifer; (5) very low; (4) low; (2) high.....	50
Figure 2 – Synthesis of the geological map of the outcrop portion of the basement of the Paraná Basin limited to the state of Paraná (adapted after Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; MINEROPAR, 2006; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018; Patias et al., 2019).....	52
Figure 3 – General flowchart with the synthesis of stages this work. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.....	54
Figure 4 – Flowchart of the stages for processing water productivity data associated with the lineaments. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.....	55
Figure 5 – Flowchart of the stages for the treatment of aeromagnetic data: treatment from an initial geodatabase, gridding, qualitative analysis (enhancement techniques - filters) and semiquantitative (depth estimation), geospatial analysis of productivity of oriented magnetic gradients and method validation. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.	58
Figure 6 – Cumulated frequency of the specific capacity of the 224 wells studied at Crystalline Basement Aquifer System. The black line represents the general median of the wells: 0.29 m ³ /h/m.....	60
Figure 7 – A) Digital Elevation Model (DEM) base for tracing of multi-scale lineaments: B) 1:100,000; C) 1:250,000; and, D) 1:400,000. In the rose diagrams, the calculated azimuths and the number of lineaments are shown. The petals were arranged every 10° and up to 8% at the outer limit.	62
Figure 8 – Relationship between wells and lineament buffers at different scales: A) number of wells x buffer sizes; B) productivity x size of lineament buffers; C) number of wells x size of buffers from lineaments' intersection points; D) productivity x size of buffers from lineaments' intersection points.	63

Figure 9 – Maps of kernel density of lineament scale 1:100,000. A) Density of lineaments; B) Density of lineament intersections.	64
Figure 10 – Radially measured power spectrum (RAPS) - A) RAPS ¹ , the sources were broken down into deep, intermediate, shallow and noise (partial and total) from the first total magnetic anomalous field - TMA ¹	67
Figure 11 - Map of magnetic sources broken down according to depth: A) Total magnetic anomalous (TMA ¹); B) Deep sources; C) Intermediate sources; D) Shallow sources; E) Partial noise; F) Total noise.	68
Figure 12 - Tracing of oriented magnetic gradients (OMGs) on the map of intermediate sources and their respective rose diagrams (10° between the bars - 18% maximum frequency). A) Tracing with the NW-SE structures highlighted; B) Layout with the highlighted NE-SW structures; C) Integration of OMGs.	70
Figure 13 – Simplified map of the lithological units used in the correlation of water productivity in the CBAS region.	71
Figure 14 – Cumulative frequency graph of wells productivity by hydrolithological units. The units are: quartzites, gneisses, granitoids (HGM), granitoids (LGM), schists, guabirotuba/gneisses (sedimentary aquifer over gneisses), phyllites, and volcanics/metasedimentary. The dashed line represents the median productivity of the general database: 0.29 m ³ /h/m.	72
Figure 15 – Relationship between well productivity, number of wells (top of columns) and azimuth classes encompassed within a 350 m-buffer from lineament extracted at different scales: A) Lineaments at 1:100,000 - 162; B) Lineaments at 1:250,000 - 135 wells; and, C) Oriented Magnetic Gradients at 1:250,000 - 77 wells.	75
Figure 16 - Rose diagram of the 1:100,000 scale lineaments clipped to each hydrolithological units separately. The red colored arrows and petals indicate the best directions and the blue arrows, the poorest directions associated with productivity.	76

LISTA DE TABELAS

ARTIGO

Table 1 - Univariate statistics of yield (Q) values, specific capacity (Q/s), and depth of wells in the general database. SD = standard deviation.	61
Table 2 - Productivity of crystalline aquifers in states or neighboring regions to the CBAS. Some works used either specific capacity or yield.	61
Table 3 - Productivity values of the different classes of density ranges. The number of wells for each class was separated and the median was calculated.	65
Table 4 - Parameters from different magnetic sources after application of the RAPS technique. The values of the wavenumber were inputs in Equation 3, resulting in the wavelength. The wavelength served as cut-off parameters to low-pass, high-band and high-pass filters to generate the maps of the different magnetic depth sources.	66
Table 5 - Wells productivity per lithology and productivity of hydrolithological units. Q/s = Specific capacity; WE = Water entrance (meters below ground).	72
Table 6 - Relationship between number of wells, median of productivity (m ³ /h/m) and lineaments azimuth discriminated by hydrolithological units within CBAS. Qz = quartzites; Gn = gneisses; Gr = granitoids; Sch = schists; Gua/Gn = Guabirotuba/gneisses; Phy = phyllites; Vol/Met = Volcanics/metasedimentary.	77

LISTA DE EQUAÇÕES

DISSERTAÇÃO

Equação 1 – Lei Cúbica: cálculo da condutividade hidráulica em meios fraturados	21
Equação 2 – Cálculo da capacidade específica	27
Equação 3 – Código python para reclassificar os azimutes dos lineamentos em notação de rumo (e.g. N90W; N80W; ...; N90E)	40
Equação 4 – Código python para reclassificar os azimutes dos lineamentos a cada 10° para auxiliar na estatística de produtividade em planilhas eletrônicas (e.g. 10°; 20°;...; 180°)	41
Equação 5 – Cálculo do comprimento de onda das fontes magnéticas	46

ARTIGO

Equation 1 – Python code to reclassify the azimuths of lineaments in course notation....	56
Equation 2 – Python code to reclassify the azimuths every 10° assist in productivity statistics in spreadsheets	56
Equation 3 – Calculation of the wavelength of magnetic sources.....	58

LISTA DE APÊNDICES

ARTIGO

Appendix 1 - Table with the RGB color codes of the percentiles used in the classification of the wells.	81
Apeendix 2 - Python Code – Complete Equation 1.....	82
Appendix 3 - Python code – Complete Equation 2.	83
Appendix 4 - RAPS ² - the sources were broken down into deep, intermediate and shallow from the second total magnetic anomalous with NW-SE - TMA ² directional cosine filter.	84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 PERGUNTA CIENTÍFICA, HIPÓTESES E OBJETIVOS	17
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 ESTADO DA ARTE	20
2.1 AQUÍFEROS FRATURADOS – CONCEITOS BÁSICOS	20
2.2 ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA AQUÍFERO EMBASAMENTO CRISTALINO (SAEC)	28
2.3 SÍNTESE DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO DO SAEC	30
2.4 MAGNETISMO DE ROCHAS E MINERAIS – CONCEITOS BÁSICOS.....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 BANCO DE DADOS E ESPACIALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES	37
3.2 TRATAMENTO DOS LINEAMENTOS MULTI-ESCALA EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO.....	38
3.3 ANÁLISE QUALITATIVA E SEMIQUANTITATIVA DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS	43
3.4 PRODUTIVIDADE DAS UNIDADES HIDROLITOLÓGICAS	48
4 RESULTADOS	49
4.1 PAPER - LITHO-STRUCTURAL CONDITIONING EXPLORATION OF FRACTURED AQUIFERS: A CASE STUDY IN THE CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFER SYSTEM, BRAZIL.....	49
APPENDICES	81
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino - SAEC (Brasil, 2015) é do tipo fraturado (Feitosa et al., 2008; Diniz et al., 2014) e compreende a uma área de aproximadamente 24.000 km² localizado no estado do Paraná, região sul do Brasil. Mais precisamente, o SAEC (Figura 1) é uma parte da porção aflorante do embasamento cristalino da Bacia do Paraná (Almeida et al., 1977) e correlato a feições geomorfológicas do Primeiro Planalto Paranaense de Maack (1947) e ITCG (2006).

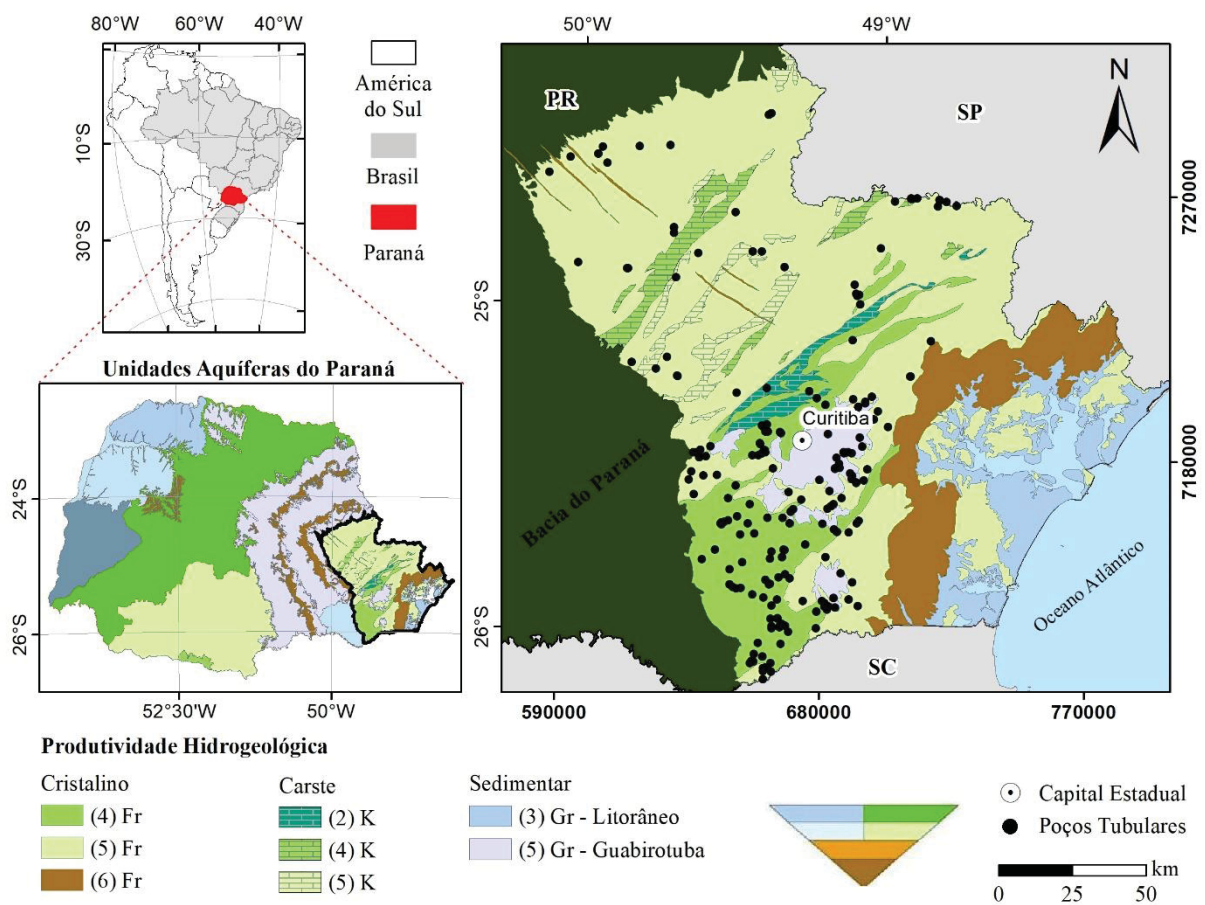


Figura 1 - Localização do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino – SAEC (área de estudo), poços tubulares utilizados na pesquisa e os índices de produtividade das regiões do aquífero (modificado de Brasil, 2015). As cores e valores em parêntesis de produtividade do aquífero referem-se ao padrão internacional em Struckmeier e Margat (1995) e UNESCO (1983): tipo de aquífero verde – fraturado (Fr); verde hachurado – carste (K); azul – intergranular (Gr); marrom – não aquífero; índice de produção (6) bastante improdutivo; (5) muito baixo; (4) baixo; (2) alto.

Diversos trabalhos associam a produtividade hídrica em terrenos cristalinos à condicionantes litoestruturais e à tectônica cenozoica específica em cada região. Como exemplo, pode-se citar alguns estudos como no estado de São Paulo (Fernandes e Rudolph, 2001; Neves e Morales, 2007a, 2007b; Alves, 2008; Madrucci et al., 2008; Fernandes et al.,

2011, 2016); Rio Grande do norte (Coriolano et al., 2000); Ceará (Souza Filho, 2008; Friedel et al., 2012). No Paraná as mesmas considerações foram postas por Athayde (2013) para os derrames vulcânicos do Sistema Aquífero Serra Geral e por Chavez-Kus e Salamuni (2003, 2008b) referindo-se ao Complexo Atuba, na porção cristalina da região metropolitana de Curitiba, capital do estado do Paraná.

É importante destacar que as estruturas paralelas ao σ_1 teoricamente são as mais abertas, correspondentes às fraturas do tipo T do modelo de cisalhamento de Riedel (Ramsay e Graham, 1970; Fossen, 2016), as quais permitiriam maior percolação e armazenamento de água (Chavez-Kus e Salamuni, 2008a; Fernandes, 2008).

A motivação dessa pesquisa advém da importância de diversas regiões, com forte potencial econômico no país, demandarem água desse tipo de aquífero, seja para uso doméstico, agropecuário ou industrial, o que potencializa também a necessidade no fomento desse estudo. Dentre estas, por exemplo, o estado do Rio de Janeiro que possui 80% dos seus aquíferos em terreno cristalino (Barreto et al., 2000; Martins et al., 2006); o estado de São Paulo com 37%, onde estão presentes importantes regiões industriais como Sorocaba, Campinas e a Grande São Paulo (Fernandes et al., 2005); e Paraná, com 10%, incluindo a capital Curitiba (Brasil, 2015).

Além da demanda, a imprevisibilidade da produtividade hídrica em terrenos cristalinos é um fator preponderante no tocante aos riscos exploratórios que esse tipo de aquífero possui. Esta imprevisibilidade é, em grande parte, devido ao desconhecimento da evolução geológica e das descontinuidades pré-existentes.

1.1 PERGUNTA CIENTÍFICA, HIPÓTESES E OBJETIVOS

Booth et al. (2015, p.52) propõem metodologicamente que perguntas científicas e hipóteses sejam norteadoras de pesquisas, tais como dissertações, teses e artigos, por delimitarem sistematicamente o problema científico que se deseja resolver ou contribuir. Nesse sentido, a pergunta que motiva esta pesquisa é:

Condicionantes exploratórios, tais como lineamentos, gradientes magnéticos orientados, litologia e estruturas geológicas previamente mapeadas e/ou tectonicamente ativas durante o Cenozoico podem contribuir hidrogeologicamente na produtividade de poços tubulares locados no embasamento cristalino paranaense?

Tendo essa pergunta em vista, o objetivo geral desse trabalho, portanto, foi definir os condicionantes litoestruturais que contribuem na produtividade hídrica dos poços tubulares com o intuito de reduzir o risco exploratório no SAEC.

Uma vez que esses condicionantes litoestruturais supracitados sejam a base para as hipóteses desse trabalho, os objetivos específicos foram:

- a) Identificar as distâncias, direções e densidade das descontinuidades geológicas, em multi-escala, que apresentam os melhores índices de produtividade;
- b) Ratificar os alvos exploratórios mapeáveis no relevo e apontar novos alvos exploratórios com base na hidrogeofísica, tendo em vista os novos dados de aeromagnetometria disponíveis pela CPRM;
- c) Identificar as litologias com melhores índices de produtividade, a partir da proposta de separação em unidades hidrolitológica;
- d) Verificar se a correlação entre os esforços da tectônica cenozoica e as estruturas geológicas do SAEC influenciam na produtividade dos poços tubulares.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Conforme as Normas Complementares 01/14 (<http://www.posgeol.ufpr.br>), do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), esta dissertação é estruturada no modelo de artigo científico, cuja composição é dada por cinco capítulos: Introdução, Estado da Arte, Material e Métodos, Resultados, Referências e Considerações Finais.

Na *Introdução* são apresentadas as considerações iniciais e localização da área de pesquisa, bem como os objetivos, hipóteses, justificativas e a pergunta que motivou essa pesquisa.

No *Estado da Arte* são apresentadas algumas argumentações acerca do embasamento teórico dos temas abordados na pesquisa.

Em *Material e Métodos* são apresentados os dados, e suas fontes, utilizados na pesquisa, assim como os programas utilizados nos processamentos espaciais e estatística, mediante a necessidade de cada etapa.

Os *Resultados* foram compilados em um artigo intitulado “*LITHO-STRUCTURAL CONDITIONING EXPLORATION OF FRACTURED AQUIFERS: A CASE STUDY IN THE CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFER SYSTEM, BRAZIL*”, submetido à revista *Hydrogeology Journal*. Esse artigo aborda a correlação geoespacial de condicionantes geológicos que influenciam na produtividade hídrica de poços tubulares localizados no embasamento cristalino. Essa avaliação é feita fundamentalmente com base nos lineamentos traçados em modelos digitais de elevação, gradientes magnéticos orientados traçados nos mapas geofísicos,

litologia e hidrografia respeitando critérios e conceitos que os aquíferos fraturados e geoprocessamento demandam.

Em Considerações Finais são apontadas perspectivas futuras a fim de dar continuidade a este trabalho, tais como, quando possível, enriquecer o banco de dados de poços tubulares, traçados dos lineamentos e dos gradientes magnéticos orientados em maior detalhe, mapa geológico de maior detalhe e ampliar as informações acerca das reativações tectônicas cenozoicas nos diferentes terrenos que compõem o embasamento cristalino.

As Referências da dissertação e do artigo estão localizadas no final da dissertação.

2 ESTADO DA ARTE

Neste tópico foi abordada a fundamentação teórica desta pesquisa, que constitui um elemento chave para as pesquisas científicas, uma vez que reúne e sintetiza importantes referências para as discussões subsequentes.

2.1 AQUÍFEROS FRATURADOS – CONCEITOS BÁSICOS

Aquíferos são unidades geológicas permeáveis e saturadas que têm a capacidade de armazenar e transmitir significativas quantidades de água (Freeze e Cherry, 1979). Tendo os aquíferos fraturados a sua particularidade quanto à porosidade, meio pelo qual a água percola e armazena.

Diferentemente da porosidade intergranular que geralmente caracteriza os aquíferos sedimentares, os aquíferos fraturados dependem essencialmente da abertura das fraturas presentes nas rochas ígneas e metamórficas, isto é, nas rochas cristalinas, salvo casos que existam rochas sedimentares com porosidade dupla (porosidade intergranular e fraturada). Caso contrário, as fraturas tendem a estar fechadas, ocasionando em poços secos quando perfuradas (Figura 2).

Essa natureza é controlada pelos processos tectônicos, com a geração de diversos tipos de fraturas sob diferentes ângulos, e atectônicos, por meio de juntas de alívio principalmente sob ângulos horizontais/sub-horizontais (Feitosa et al., 2008). Por conta disso, os aquíferos em terrenos cristalinos são comumente descritos como sistemas de complexa compreensão (Gleeson e Novakowski, 2009) vista a sua não homogeneidade quanto à distribuição das suas fraturas e da conectividade das mesmas (Domenico e Schwartz, 1990).

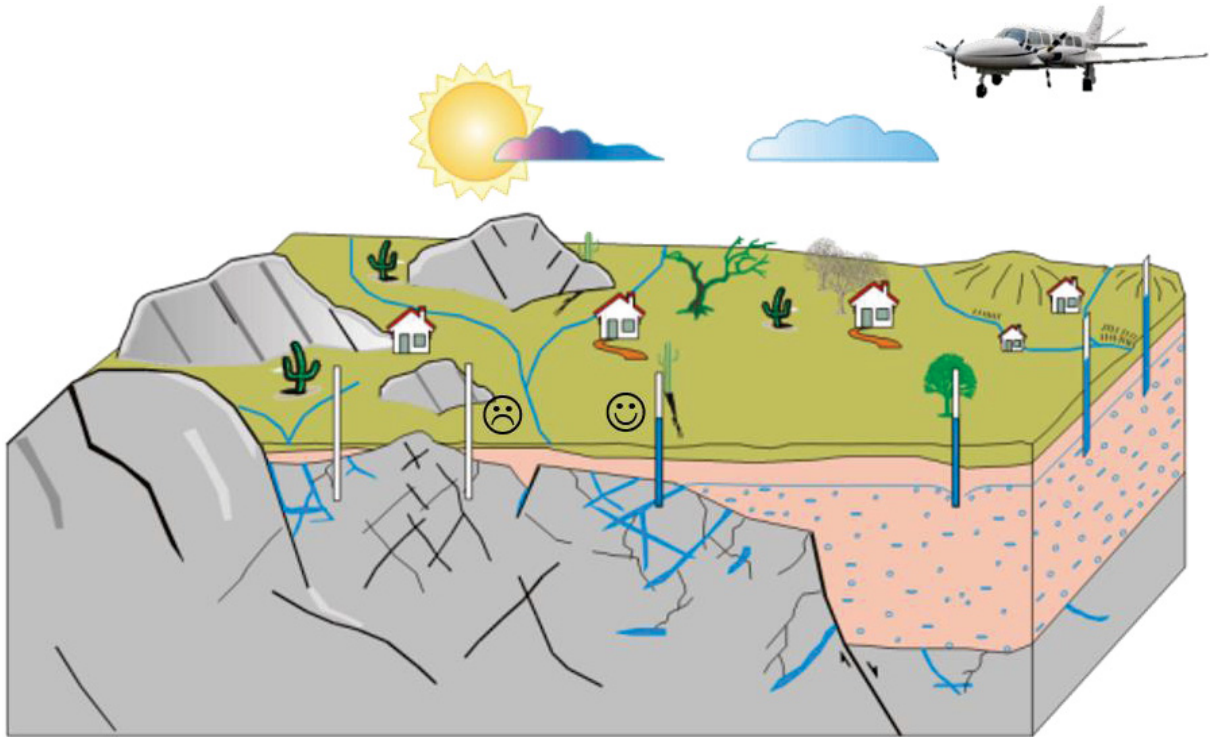


Figura 2 - Ilustração de um aquífero fraturado, onde as fraturas abertas têm a maior possibilidade conter água e poços produtivos, enquanto que fraturas fechadas têm a maior possibilidade de não conter água, ocasionando poços secos, ou seja, não produtivos. Cinza: rochas cristalinas; rosa: rochas sedimentares. Fonte: Modelo ilustrativo do contexto hidrogeológico (modificado de Feitosa et al., 2008); aeronave responsável pelo levantamento geofísico (CPRM, 2011).

Estudos com foco na geologia estrutural demonstram a importância e necessidade de viabilizar o uso das águas subterrâneas em aquíferos fraturados, dada as inúmeras variáveis relacionadas a esse contexto (Fernandes, 1997).

Dada a Lei Cúbica (Snow, 1968 apud Freeze e Cherry, 1979), é possível perceber que há uma relação direta e exponencial entre a condutividade hidráulica (Equação 1) e a abertura das fraturas das rochas (Figura 3). A Lei Cúbica mostra também que a abertura das fraturas (b) é mais importante que a densidade de fraturas, além disso não há necessariamente uma relação direta entre permeabilidade e número de fraturas atravessadas pelos poços (Briz-Kishore, 1993; Gale e Rouleau, 1983 apud Fernandes, 2008), conforme Figura 4.

Equação 1

$$K = (\rho \cdot g / 12 \cdot \mu) \cdot N \cdot b^3$$

Onde: K , condutividade hidráulica; ρ e μ , densidade e viscosidade da água, respectivamente; N , número de fraturas por unidade de medida; b , abertura das fraturas.

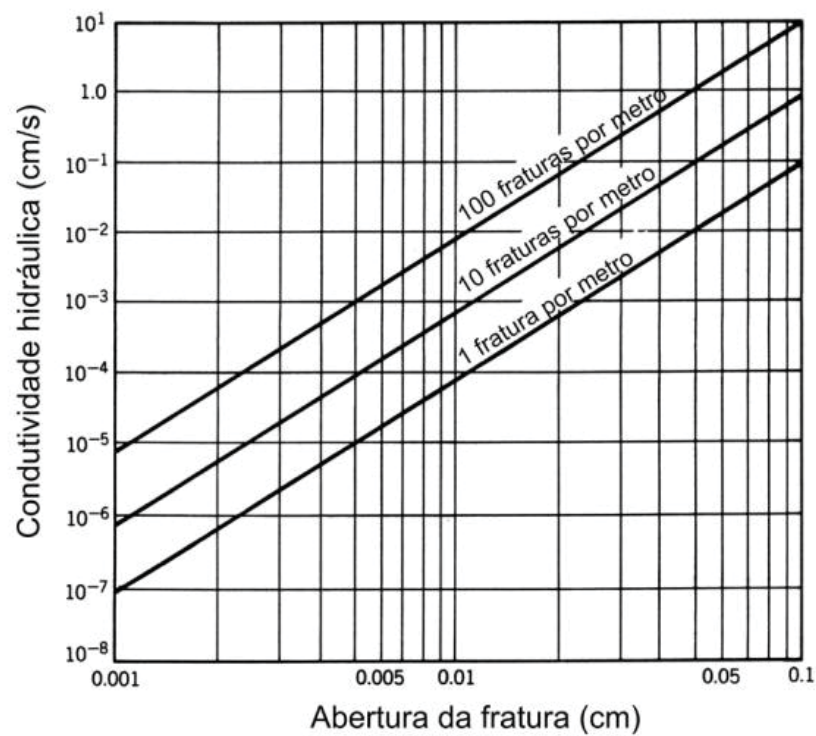


Figura 3 - Relação entre abertura das fraturas e condutividade hidráulica (Hoek e Bray, 1981 apud Domenico e Schwartz, 1990).

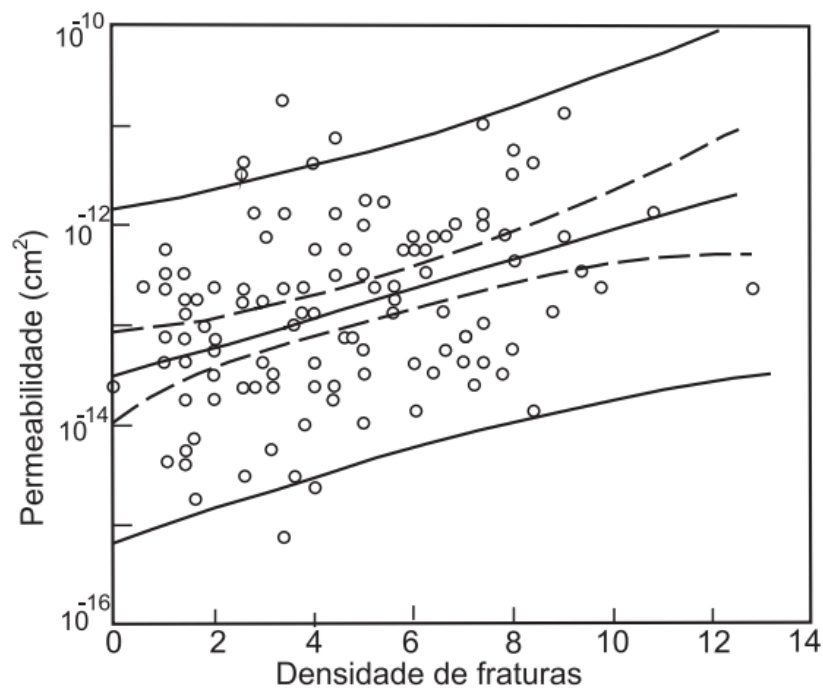


Figura 4 - Correlação relativamente independente entre permeabilidade e densidade de fraturas (Gale e Rouleau, 1983 apud Fernandes, 2008).

A depender do regime tectônico que atuou ou atua no local, os tipos de fraturas geradas são necessariamente consequências do posicionamento dos tensores, seja em regimes extensionais, compressivos ou cisalhantes. Fraturas com maior potencial de serem abertas,

oriundas de processos extensionais e transcorrentes, tendem a ser verticalizadas, enquanto que em regimes compressivos tendem a ser mais horizontalizadas (Ramsay e Graham, 1970; Fossen, 2016).

Essas fraturas geradas a partir desses regimes tectônicos podem manifestar feições no relevo (O’Leary et al., 1976; O’Leary e Friedman, 1978) de caráter geométrico, tais como lineamentos (Tirén, 2010).

Análises de lineamentos relacionando o mapeamento geológico pré-existente às interpretações articuladas no geoprocessamento com foco na produtividade hídrica de poços tubulares têm sido alvo de estudo de diversas pesquisas. Isso inclui conclusões acerca dos regimes tectônicos atuantes em um determinado local.

Fernandes e Rudolph (2001) analisaram lineamentos fotointerpretados à luz dos compartimentos morfoestruturais e da história da tectônica cenozoica na região de Campinas, embasamento do estado de São Paulo. Direções produtivas provenientes de um paralelismo com tensores tectônicos ativos foram identificadas a partir da correlação espacial entre os poços tubulares utilizados com essas estruturas e regimes interpretados (Figura 5).




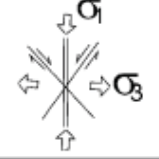

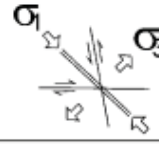

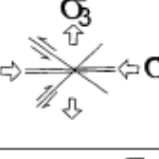


Age	Conjugate fracture patterns related to the events	Direction of shear and extension fractures (plan view)	Direction of shear fractures	Direction of extension fractures	Event name
Quaternary			N20-30W and N50-60E	N10-30E	E5-NNE
			N30-50W and N30-50E	NS	E4-NS
			WNW and NNW-NS	N30-60W	E3-NW
Neogene			N45-65W and N45-65E	EW	E2-EW
Paleogene Cretaceous			EW-ENE and NNE-NS	NE	E1-NE

Figura 5 - Reconstituição de paleostress, período provável de atuação e direções das fraturas cisalhantes e extensionais (Fernandes e Rudolph, 2001).

Coriolano (2002) resgata um modelo clássico iniciado em Siqueira (1967) sobre o conceito de Riacho-Fenda (Figura 6), o qual corresponde a fraturas subjacentes a drenagens identificadas na região nordeste do Brasil. A autora complementa também com a importância da associação necessária para estudo hidrogeológicos em terrenos cristalinos entre fotografias aéreas, imagens de satélites, levantamentos de campo (litologias e estruturas em escala de afloramento) e geofísica.

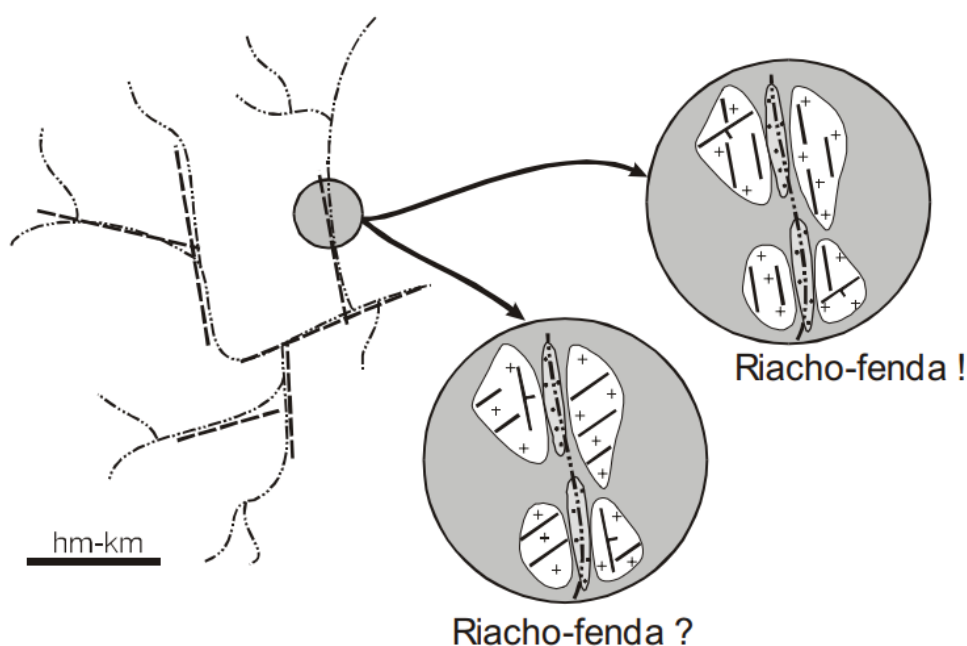


Figura 6 – Modelo esquemático do conceito de Riacho-Fenda, no qual as drenagens podem representar fraturas subjacentes (Coriolano, 2002).

Chavez-Kus (2008) identificou reativações cenozoicas no embasamento do estado Paraná, levando em consideração a conectividade dessas fraturas e as direções N-S, correspondentes às direções dos últimos tensores atuantes.

Para essa perspectiva geométrica dos campos de stress, essa autora teve como base o modelo de cisalhamento de Riedel (Ramsay e Graham, 1970; Fossen, 2016), e algumas possibilidades em termos de reativação em multi-escala dessas estruturas foram abordadas. Embora em escalas regionais (em nível continental) haja uma atuação específica do stress em regimes compressoriais atuais, em escala de terrenos ou de litologias (escala mais local) é possível que haja desvio da direção de stress em escalas de ordens ou magnitudes diferentes (Figura 7).

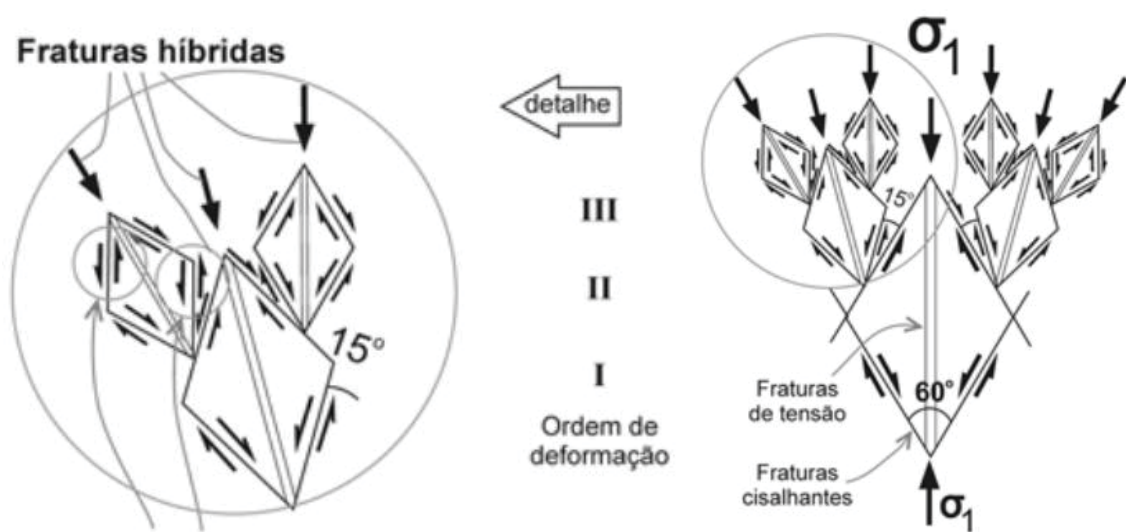


Figura 7 – Diferentes planos de fraturas cisalhantes e tensionais conforme sua escala de distribuição (Ruhland, 1973).

Geólogos e geólogos estruturalistas também reconheceram reativações cenozoicas em outros locais do país, sendo que para outras finalidades específicas em suas pesquisas, conforme algumas pesquisas citadas abaixo.

Ferrari (2001) interpretou as direções deformacionais na geração e reativação do que o autor denominou como Gráben da Guanabara, porção do estado do Rio de Janeiro, onde principalmente direções como NE-SW (transcorrência sinistral no Paleoceno), NW-SE (extensão no Eoceno e Oligoceno), NE-SW (transcorrência dextral no Pleistoceno) e E-W (extensão no Holoceno) tiveram um papel fundamental na estruturação da região.

Oliveira et al. (2018) abordam correlações litoestratigráficas à luz da neotectônica no norte do Espírito Santo e ao sul da Bahia, onde as direções N-S e NE-SW teriam sido reativadas.

Na Província da Borborema, Bezerra et al. (2014) identificaram reativações nas direções E-W e NE-SW na Bacia da Paraíba, enquanto que Vasconcelos (2018) identificou reativações nas direções E-W e NNE-SSW nas Bacias Sergipe-Alagoas e Pernambuco.

Rivas et al. (2019) identificaram reativações nas direções NW-SE, durante o período pós-cretáceo, e mais expressivamente NE-SW, durante o Neógeno e Pleistoceno, no estado do Paraná, em região próxima (na ordem de uma centena de quilômetro aproximadamente) ao embasamento aflorante.

Chama-se aqui a atenção para esses trabalhos supracitados (além de outros mais que poderiam ser incluídos) devido à possibilidade desses campos, ou direções, de stress atuantes durante o Cenozoico também estarem contribuindo na produtividade hídrica dos poços tubulares dessas respectivas regiões.

Nesta pesquisa, o termo produtividade foi exclusivamente reservada ao conceito da Capacidade Específica (ou vazão específica), normalmente sua unidade de medida é escrita em $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ e pode ser calculada conforme a Equação 2:

Equação 2

$$Q_s = Q / s = Q / (ND - NE)$$

Onde: Q_s = capacidade específica; Q = vazão, ND = nível dinâmico, NE = nível estático, $s = (ND - NE)$ = rebaixamento.

Apesar do estudo de produtividade hídrica envolvendo a análise de lineamentos já estar bem consolidada na hidrogeologia, alguns outros autores e autoras, em caráter relativamente inovador, incluíram o uso de dados potenciais aeromagnéticos no país (e.g. Madrucci, 2003; Pinéo, 2005; Souza Filho, 2008; Athayde, 2013; Brito, 2018; Dessart et al., 2020). Essa relação entre a geofísica e hidrogeologia tem sido tratada por alguns autores como hidrogeofísica (Feitosa et al., 2008; Souza Filho, 2008; De Souza et al., 2019).

A utilização da aeromagnetometria permite identificar estruturas em subsuperfície e contribui amplamente na investigação em lugares de difícil acesso (Figura 2). Fraturas podem conter minerais magnéticos em sua trama a depender do seu contexto de formação, geoquímica da rocha fonte, dentre outros fatores como será explicada mais adiante no Tópico 2.4. Por conta disso, a análise de lineamentos pode ser substanciada quando espacialmente coincidir com gradientes magnéticos orientados. Por outro lado, sob outra perspectiva, a análise de gradientes magnéticos orientados (GMOs) não coincidentes com lineamentos pode revelar estruturas não mapeáveis em superfície.

Contudo, a utilização dessa técnica tem sido aplicada principalmente no âmbito exploratório (e.g. Freitas, 2005; Correia et al., 2010; Magalhães e Souza Filho, 2012) e mapeamento geológico (e.g. Castro e Ferreira, 2015; Weihermann et al., 2018; Patias et al., 2019). Isso demonstra a carência e chama a atenção para o fomento da aplicabilidade na hidrogeologia, sobretudo em pesquisas envolvendo terrenos cristalinos.

Além dos temas abordados até então nesse tópico embasarem a essência da pesquisa, o estudo em terrenos cristalinos possui outras formas eficientes de investigação focando na produtividade.

Madrucci (2004) e Souza Filho (2008) conduziram suas pesquisas com foco em técnicas visando a temática da favorabilidade aplicada à hidrogeologia, nas regiões cristalinas

dos estados de São Paulo e Ceará, respectivamente, utilizando ferramentas como Pesos de Evidência (*Weight of Evidence*) (Bonham-Carter, 1994). Em suma, este método é normalmente utilizado no estudo de prospecção mineral (e.g. Magalhães e Souza Filho (2012) - no estado do Amapá), e tem por base conceitual atribuir pesos aos parâmetros geológicos (tais como lineamentos, GMOs, litologias, hidrografia etc.) conforme a presença e/ou ausência nos locais próximos e distantes do alvo de interesse.

Brito (2018), e mais recentemente, Oliveira et al. (2020), no estado de Minas Gerais, utilizaram o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), no qual se constrói sistematicamente uma escala hierárquica com os pesos reclassificados dos parâmetros geológicos, e no final uma álgebra de mapas é realizada a fim de indicar também as regiões mais favoráveis à prospecção hídrica.

2.2 ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA AQUÍFERO EMBASAMENTO CRISTALINO (SAEC)

A área do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC) compreende a 5 bacias hidrográficas (BH), sendo elas limitadas ao Primeiro Planalto Paranaense (Maack, 1947; ITCG, 2008). Dentre essas BHs, estão as BHs Litorânea, Ribeira, Alto Iguaçu, Alto Tibagi e Alto Itararé (Figura 9), inseridas parcialmente dentro da área do SAEC (ITCG, 2008). O clima da região é predominantemente oceânico, com verões mais úmidos que o inverno e precipitações bem distribuídas ao longo do ano (ITCG, 2008) e as médias anuais de precipitação variam entre 1.300 e 1.600 mm (CPRM, 2006) (Figura 9). O clima da região costeira é caracterizado como subtropical e equatorial (ITCG, 2008), as médias anuais de precipitação nessa região variam em quase o dobro das médias correspondentes ao Primeiro Planalto, com valores entre 1.600 e acima de 2.600 mm (CPRM, 2006), caracterizando um regime climático e pluviométrico diferenciado.

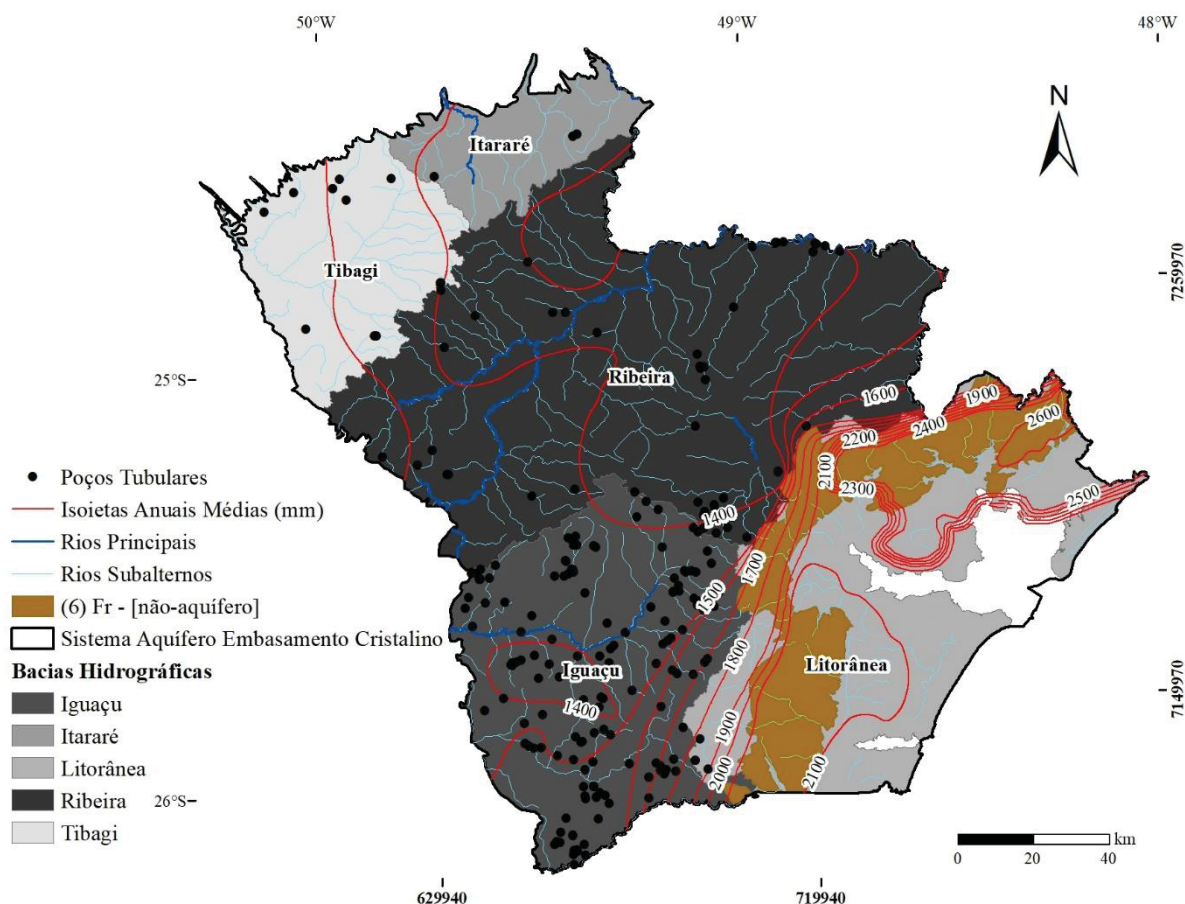


Figura 9 - Bacias hidrográficas, índices de pluviosidade e hidrografia da região do SAEC (adaptado de CPRM, 2006; ITCG, 2008; Brasil, 2015).

Com base em 236 poços tubulares locados no SAEC, Brasil (2015) avaliou diversos parâmetros hidrodinâmicos. A mediana avaliada da capacidade específica é $0,30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, vazão $6 \text{ m}^3/\text{h}$, nível estático 2,53 m, nível dinâmico 28 m e profundidade dos poços 90 m. A mediana da profundidade das entradas de água (EA) no SAEC são $EA1 = 29 \text{ m}$, $EA2 = 42 \text{ m}$, $EA3 = 54,5 \text{ m}$, $EA4 = 40 \text{ m}$, $EA5 = 42$ e a mediana geral é 36 m.

O SAEC foi separado em 3 diferentes classes segundo os parâmetros de produtividade em Diniz et al. (2014) (Figura 1).

Classe 4, produtividade baixa, porém localmente moderada. Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privativo. A capacidade específica varia entre $0,4$ e $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazão entre 10 e $25 \text{ m}^3/\text{h}$. As rochas dessa classe correspondem principalmente ao Complexo Atuba, na BH do rio Iguaçu e aos *trends* de direção nordeste da BH do rio Ribeira.

Classe 5, produtividade geralmente muito baixa, porém localmente baixa. Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos. A capacidade específica varia entre $0,04$ a $0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazão 1 e $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. As rochas dessa classe correspondem principalmente às rochas do Grupo Açungui e Complexo Setuva, isto é em poços locados nos granitoides das

unidades Três Córregos, Cunhaporanga e sobre as rochas do Grupo Castro, com exceção das unidades carbonáticas do Aquífero Carste.

Classe 6, pouco produtivo ou não-aquífero. Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais, a capacidade específica é menor que 0,04 m³/h/m e vazão menor que 1 m³/h. As rochas dessa classe correspondem às escarpas e montanhas da Serra do Mar, pois o elevado declive compromete a infiltração e consequente recarga do aquífero.

2.3 SÍNTESE DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO DO SAEC

O contexto geológico do aquífero (Figura 10) é constituído por rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas com estruturação predominantemente NE-SW, e estruturas juro-cretácias NW-SE correspondentes aos diques do Arco de Ponta Grossa - APG (Almeida et al., 1977; Ferreira, 1983). O arcabouço tectônico corresponde à porção sul do Cinturão Ribeira, onde estão inseridos os Terrenos Apiaí (TA), Curitiba (TC), Paranaguá (TP) e Microplaca Luis Alves (MLA) (Campos Neto, 2000; Heilbron et al., 2008; Castro e Ferreira, 2015; Passarelli et al., 2018).

O Terreno Apiaí é constituído por rochas granitoides paleoproterozoicas (Siga Júnior et al., 2005), e rochas carbonáticas, metassedimentares e metavulcanossedimentares de baixo grau metamórfico, como metarenitos, metaconglomerados, xistos, quartzitos e filitos, de idades meso a neoproterozoicas (Basei et al., 1992; Siga et al., 2009). No Neoproterozoico, o Terreno Apiaí foi afetado por um magmatismo calci-alcálico que constituem os granitoides dos batólitos Três Córregos, Agudos Grandes e Cunhaporanga (Guimarães, 2000; Prazeres Filho, 2005). Por fim, rochas vulcânicas e metassedimentares neoproterozoicas-ordovicianas da Bacia de Castro surgem em um contexto extensional pós-tectônico, onde formaram rochas vulcânicas ácidas a intermediárias intercaladas com metassedimentos conglomeráticos/areníticos e pelíticos (Basei et al., 1998a; Campanha e Sadowski, 1999).

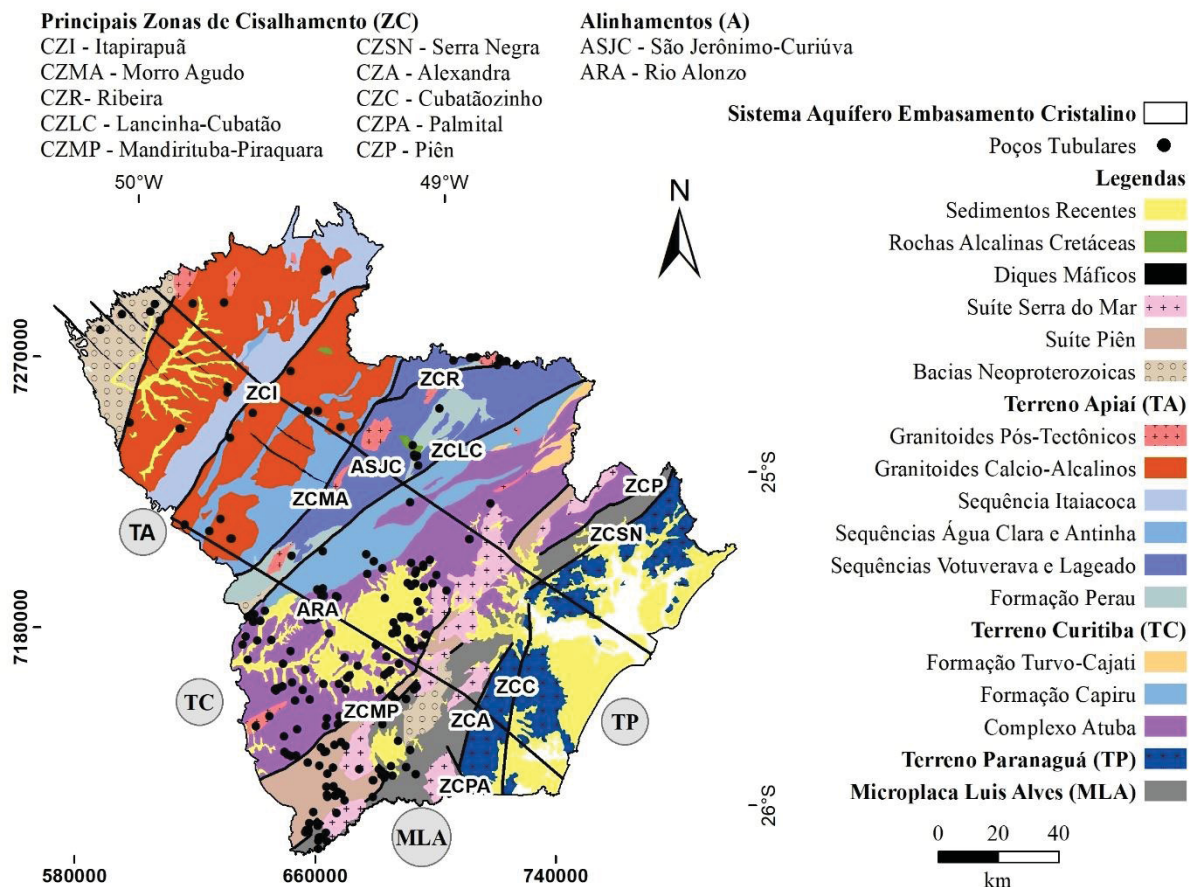


Figura 10 - Síntese do mapa geológico da porção aflorante do embasamento da Bacia do Paraná limitado ao estado do Paraná (modificado de Basei et al. (1992), Siga Junior et al. (1995), MINEROPAR (2006), Heilbron et al. (2008), Passarelli et al. (2018); Patias et al. (2019)).

O Terreno Curitiba é constituído por rochas ortognáissicas migmatíticas paleoproterozoicas do complexo Atuba (Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; Salamuni et al., 2003). Metassedimentos compostos por filitos, xistos e quartzitos das formações Turvo-Cajati, Capiçu e Complexo Setuva recobrem parte da porção nordeste e sudoeste do Complexo Atuba (Basei et al., 2008). Esse terreno foi intrudido por granitos anorogênicos da Suíte Serra do Mar durante o Neoproterozoico (Siga Júnior et al., 1999; Basei et al., 2009; Siga et al., 2009).

Cobre sobre essas unidades estratigráficas pré-cambriana a Formação Guabirotuba (Salamuni et al., 2003). Essa formação preenche a Bacia de Curitiba, cuja proveniência tectônica advém do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (Zalán e Oliveira, 2005) e é composta por sedimentos pelíticos e arenosos imaturos e, mais restritamente nas bordas da bacia, por sedimentos cascalhosos (Lima et al., 2013).

Os Terrenos Apiaí e Curitiba são separados pela Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão (ZCLC) com orientação nordeste-sudoeste (Basei et al., 1992; Campanha, 2002). Trata-se de uma mega-estrutura, com transcorrência dextral, de rejeito estimado entre 100 a 140 km e que se estende por cerca de 150 km dentro do território paranaense. Castro et al. (2014)

sugerem profundidades de até 1 km para a falha e padrões sigmoidais para a sua zona de dano, embora seu sinal magnético possa ter perdido expressividade mediante os eventos tectônicos subsequentes.

A Microplaca Luis Alves é constituída por ortognaisses granulíticos por vezes migmatizados de idades arqueanas a paleoproterozoicas. Subordinadamente rochas metavulcanossedimentares e granitoides alcalinos a peralcalinos neoproterozoicos ocorrem (Basei et al., 1998b; Passarelli et al., 2018).

O Terreno Curitiba e a Microplaca Luis Alves são separadas pela Zona de Cisalhamento Piên (ZCP), com direção nordeste-sudoeste (Siga Junior et al., 1995). Essa zona de cisalhamento é interpretada como um arco magmático subductado para direção noroeste, que originou um cinturão granítico e a suíte máfica-ultramáfica Piên (Basei et al., 2000; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018).

O Terreno Paranaguá é constituído por suítes graníticas associadas a zonas de cisalhamento que intrudiram rochas metassedimentares e o embasamento gnáissico de idade paleoproterozoica, seguido de migmatização no Neoproterozoico (Siga Junior et al., 1995; Patias et al., 2019). O Terreno Paranaguá possui limite com a Microplaca Luis Alves por meio das Zonas de Cisalhamento Alexandra, Palmital e Serra Negra de orientação NNE-SSW a NE-SW.

2.4 MAGNETISMO DE ROCHAS E MINERAIS – CONCEITOS BÁSICOS

O objetivo de um levantamento geofísico magnético é investigar a geologia com base nas anomalias do campo magnético da Terra resultantes das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície. Embora a maior parte dos minerais formadores de rochas não seja magnética, certos tipos de rochas contêm minerais magnéticos em quantidade suficiente para produzir anomalias magnéticas significativamente mapeáveis (Kearey et al., 2002). A utilização dessa técnica tem auxiliado ampla e significativamente as interpretações de feições geológicas, sobretudo regionais, com foco nas estruturas de subsuperfície (Isles e Rankin, 2013), devido principalmente à velocidade e custo da operação em grandes áreas às quais o aerolevanteamento eficientemente complementa os dados de campo preexistentes ou, até mesmo, suplementa-os, pois existem diversas áreas onde o acesso logístico humano é adverso ou restrito.

As características de magnetização das rochas são descritas como dados potenciais e dependem de sua suscetibilidade magnética. Esse atributo está relacionado ao campo magnético terrestre através de fenômenos geológicos que registram nos minerais magnéticos

características do fluxo magnético existente no momento de cristalização do material (magnetização induzida e remanente). Ou, como em outros contextos, através do registro por conta de processos metamórficos ou, menos intensamente, sedimentar; dentre outros. Assim, a concentração desses minerais magnéticos em uma rocha produz distorções locais (anomalias) no campo magnético terrestre e podem ser corpos-fonte (alvos dos magnetômetros), seja pelo componente campo total, ou pelas componentes horizontais, verticais e/ou a combinação delas (Kearey et al., 2002).

O campo magnético da Terra pode ser comparado com o campo produzido por uma esfera magneticamente polarizada (Figura 11). No polo magnético norte ele é vertical e aponta para o interior da Terra e no polo magnético sul ele é vertical e aponta para fora da Terra. As linhas de força que atravessam a esfera terrestre ficam paralelas com a superfície nas proximidades do equador. A Figura 12 representa as principais componentes do campo geomagnético.

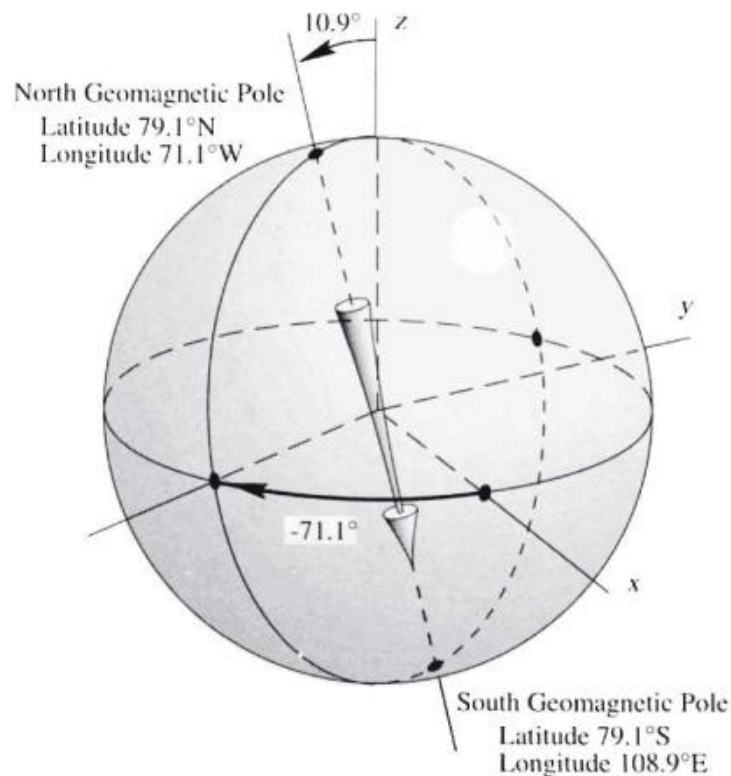


Figura 11 - Representação esquemática do campo dipolar magnético da Terra (Blakely, 1995).

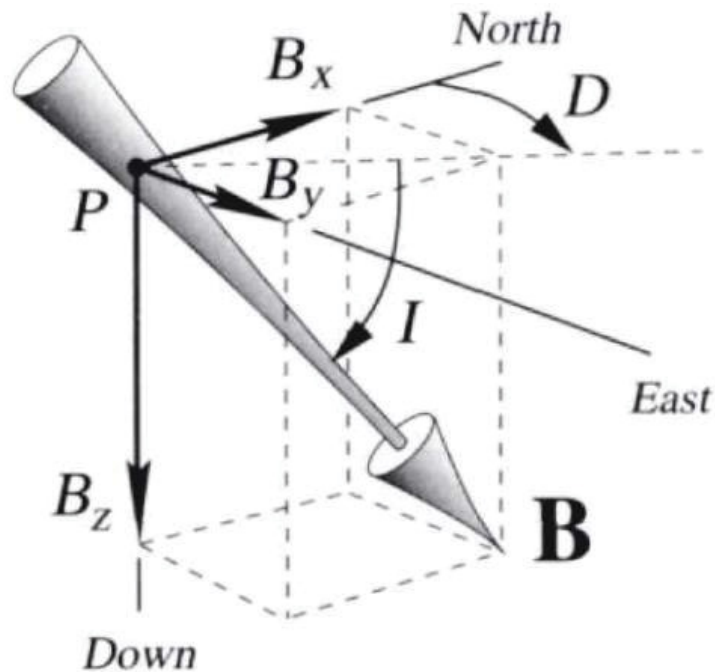


Figura 12 - Sistema de coordenadas cartesianas das principais componentes do campo geomagnético, a partir de um ponto P qualquer. N - norte geográfico; D - declinação magnética; I - inclinação magnética; B - campo total (Blakely, 1995).

O campo geomagnético é composto por três partes essenciais (Telford et al., 1990):

- I) o campo principal, que varia lentamente e tem origem em forças eletrodinâmicas no núcleo da Terra. Representam 99% da intensidade do campo magnético medido na superfície do planeta;
- II) o campo externo, produzido por variações diurnas de correntes elétricas que circulam na ionosfera. Representam uma pequena fração do campo principal e varia rapidamente (cerca de 20 a 80 nT); e,
- III) variações do campo principal, que são constantes no tempo e são causadas por anomalias magnéticas locais geradas por rochas e minerais magnéticos próximos da superfície da Terra.

Como é possível perceber, a magnetometria (“magneto”: relativo ao magnetismo + “metria”: relativo à mensuração) depende de diversas variáveis complexas que afetam diretamente o resultado do levantamento. Por conta disso, é necessário tentar corrigir ao máximo as influências que não sejam as anomalias magnéticas locais, isto é, as rochas e estruturas de interesse. Dentre essas correções, como visto acima, tem-se principalmente as variações diurnas (tempestades magnéticas e interferências dos ventos solares) e o Campo

Magnético de Referência Internacional (*International Geomagnetic Reference Field - IGRF*), sendo este último definido por um campo magnético teórico não perturbado em qualquer ponto da superfície do planeta (Kearey et al., 2002), isto é, correspondem a isolinhas (Figura 13) oriundas do “dínamo terrestre”, cuja dispersão espacial não ocorre de maneira homogênea na superfície do geoide. Essas correções devem respeitar o tempo e o espaço, devido às inversões naturais do dipolo (variações seculares) e variações do norte magnético em relação ao eixo de rotação, o qual é vinculado diretamente às declinações e inclinações magnéticas.

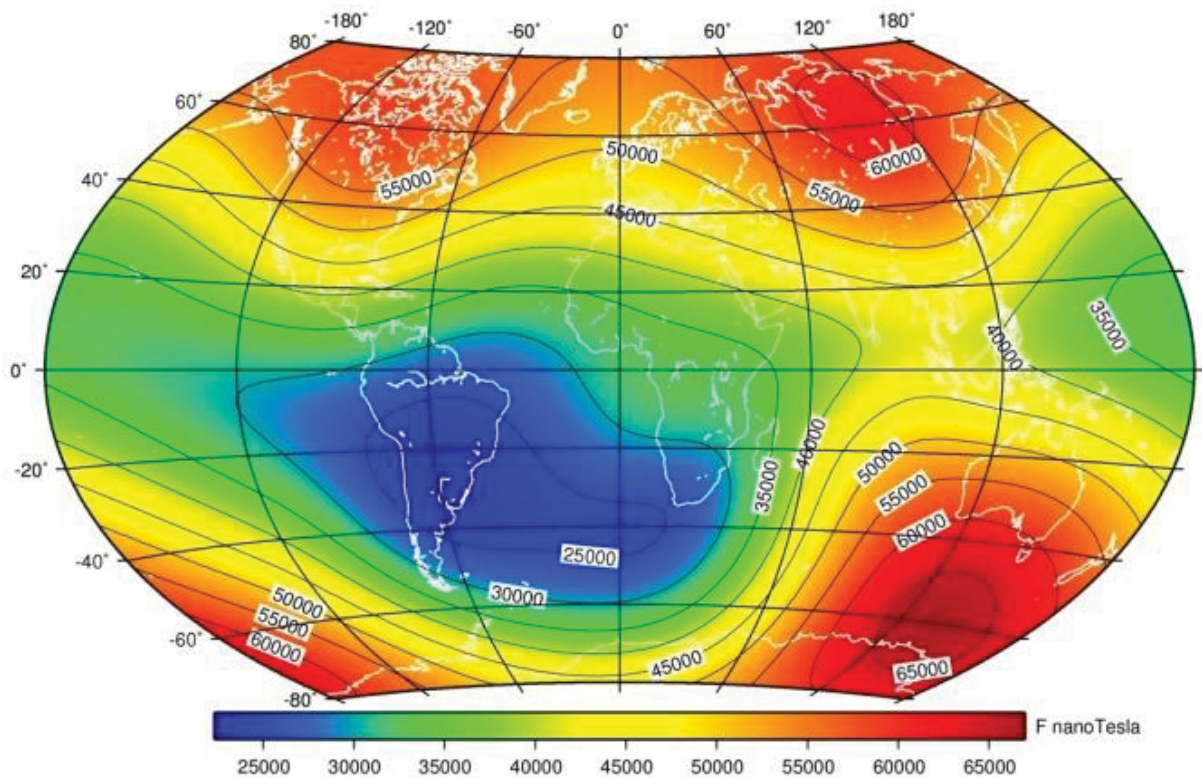


Figura 13 - Mapa de Intensidade do Campo Total do planeta Terra, sendo um dos componentes calculáveis do IGRF (BGS, 2018).

Todas as substâncias são magnéticas em uma escala atômica. Cada átomo age como um dipolo, em razão do spin de seus elétrons e da trajetória orbital dos elétrons ao redor do núcleo. A suscetibilidade magnética é um parâmetro que permite reconhecer quanto uma rocha poderá ser magnetizada pelo campo da Terra. Ela representa a proporção em que um material poderá ser magnetizado sob a ação de um campo magnético e possui um intervalo de variação muito grande entre minerais e rochas (Telford et al., 1990). Dependem basicamente das configurações orbitais pareadas ou não de seus elétrons, bem como das resultantes vetoriais oriundas dessas possibilidades de equilíbrio ou desequilíbrio eletromagnético. Todas as

substâncias podem ser classificadas em três grupos principais (Blakely, 1995), de acordo com as suas propriedades magnéticas, quais sejam:

I) substâncias diamagnéticas, que apresentam susceptibilidade magnética negativa. Isso significa que a magnetização induzida por um campo externo apresentará sentido oposto a esse campo. Todos os materiais exibem um comportamento diamagnético, porém quase sempre seus efeitos são muito pequenos para serem detectados por levantamentos aeromagnéticos;

II) substâncias paramagnéticas, que apresentam suscetibilidade magnética positiva e quando sofrem indução apresentam magnetização no mesmo sentido do campo indutor. Nessas substâncias os momentos magnéticos dos átomos individuais estão desemparelhados, assim cada átomo comporta-se independentemente em relação a um campo externo, produzindo como resultante uma suscetibilidade ligeiramente positiva. A contribuição dos minerais paramagnéticos a assinaturas magnéticas em aerolevantamentos é geralmente insignificante; e,

III) substâncias ferromagnéticas, que são materiais paramagnéticos, em que os átomos interagem sob a ação de um campo externo e os momentos magnéticos emparelham de tal forma que grupos de átomos comportam-se coletivamente e se orientam em uma configuração paralela, resultando em uma suscetibilidade muito positiva. Contudo, suas propriedades magnéticas cessam ao atingir temperaturas relativamente elevadas, denominada temperatura de Curie (limite aproximadamente do Fe em 750°C, Ni em 310°C e magnetita em 515°C), e, como consequência, esses materiais passam a se comportar como substâncias paramagnéticas. O ferromagnetismo é o responsável pela magnetização observada nos materiais geológicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho aborda, em escala regional, a questão dos condicionantes geológicos para prospecção de água subterrânea, baseado na análise multicriterial e multi-escala destes parâmetros. Essa sistematização inicia com o processamento de dados de produtividade hídrica dos poços tubulares, modelos digitais de elevação (MDEs), dados aeromagnetométricos e litologia. Seguido de estatística e geoprocessamento, resultando em mapas e gráficos de produtividade do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC). O fluxograma desta rotina é apresentado na Figura 14.

Para as análises geoespaciais de produtividade foram utilizadas ferramentas do programa ArcGISTM v. 10.6.1. Os produtos em mapa estão referenciados para o Datum SIRGAS 2000, com coordenadas geográficas e UTM / Zona 22s.

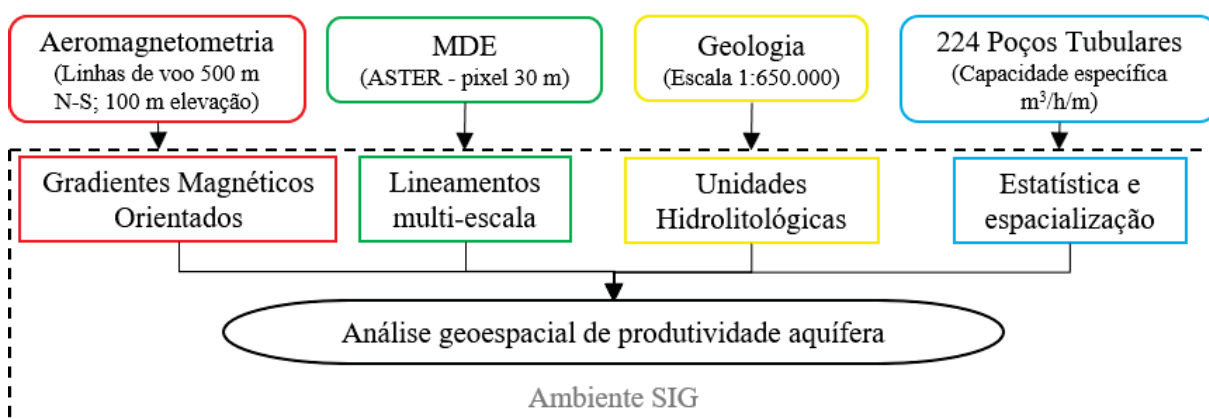


Figura 14 - Fluxograma geral com a síntese das etapas deste trabalho. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/análises SIG.

3.1 BANCO DE DADOS E ESPACIALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES

Inicialmente foram selecionados 236 poços oriundos do banco de dados da Carta das Águas do Paraná (Brasil, 2015), sendo a maioria proveniente da Companhia de Saneamento do Paraná, SANEPAR. Doze poços foram excluídos por estarem fora da delimitação prevista do SAEC, em rocha sedimentar ou na região costeira, com escassos poços e de regime climático diferente da área situada no Primeiro Planalto. Portanto, 224 poços tubulares (Figura 1) foram organizados em estatística univariada, todos com testes de bombeamento padronizados para um período de 12 horas (Brasil, 2015). Os parâmetros de produtividade (capacidade específica e vazão) e profundidade do poço, ambos objetos de análise, foram espacializados e tratados sob escalas de percentis, medianas e frequências acumuladas.

A representação com escalas em percentis foi dividida em 16 classes com o intuito de realçar com mais detalhe os valores acima do terceiro quartil e abaixo do primeiro. Essa representação foi adotada pelos Serviços Geológicos da Grã-Bretanha, Estados Unidos, Finlândia e também pela antiga MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná), cuja utilização da técnica serviu para o traçado das curvas de contorno dos mapas geoquímicos do Atlas Geoquímico do Paraná (Licht, 2001). Os intervalos aqui utilizados foram os mesmos utilizados também no projeto da Carta (Brasil, 2015), respeitando, inclusive, os valores da paleta de cores (Appendix 1 do artigo).

3.2 TRATAMENTO DOS LINEAMENTOS MULTI-ESCALA EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

As definições de lineamento utilizadas nesse trabalho seguem O’Leary e Friedman (1978): “feição linear, mapeável, simples ou composta, alinhadas de forma reta ou levemente curva”. Essas feições podem representar foliações de rochas metamórficas, camadas sedimentares, fraturas ou outras discontinuidades geológicas do embasamento, sendo sobretudo verticais ou subverticais (Tirén, 2010).

Foram traçados lineamentos multi-escala a partir de MDE, tratando imagens do sensor ASTER, com resolução de 30 m (USGS, 2018). As escalas de traçados foram 1:100.000, 1:250.000 e 1:400.000, com pseudo-iluminações nos ângulos 45°, 135°, 225° e 315°. As variações desses ângulos buscaram realçar diferentes estruturas geomorfológicas de maneira perpendicular. A digitalização dos lineamentos ocorreu com as escalas fixas, a fim de manter a coerência da fotointerpretação (Fernandes, 2008).

O traçado dos lineamentos foi realizado nas feições negativas do relevo, visto o potencial de recarga que essas feições do relevo podem ter, em detrimento das cumeeiras (Feitosa et al., 2008). Além disso, houve uma generalização dos lineamentos cujo ângulo entre eles fossem menores do que 10° de diferença, para se evitar superestimações estatísticas (Chavez-Kus e Salamuni, 2008b).

O cálculo dos valores do diagrama de rosetas foi realizado com a ferramenta AzimuthFinder (Queiroz et al., 2014), o qual pode ser acessado e instalado como forma de extensão ao *ArcToolbox*. Enquanto que a geração do diagrama de rosetas foi realizado com o auxílio do programa OpenStereo v. 0.1.2 (Grohmann e Campanha, 2010).

As análises de produtividade hídrica dos poços envolvendo os lineamentos levaram em conta a distância, direção e densidade. Para a análise da direção, foi necessário identificar

uma distância referencial (nesse caso, foi utilizado o buffer de 350 m – ver em *Resultados*), ou seja, uma etapa dependente da outra. Neste trabalho, o cálculo dos azimutes dos lineamentos foi feito antes das análises de distância, para facilitar a organização dos dados e não repetir a mesma etapa posteriormente. A sistematização do tratamento dos lineamentos está presente na Figura 15.

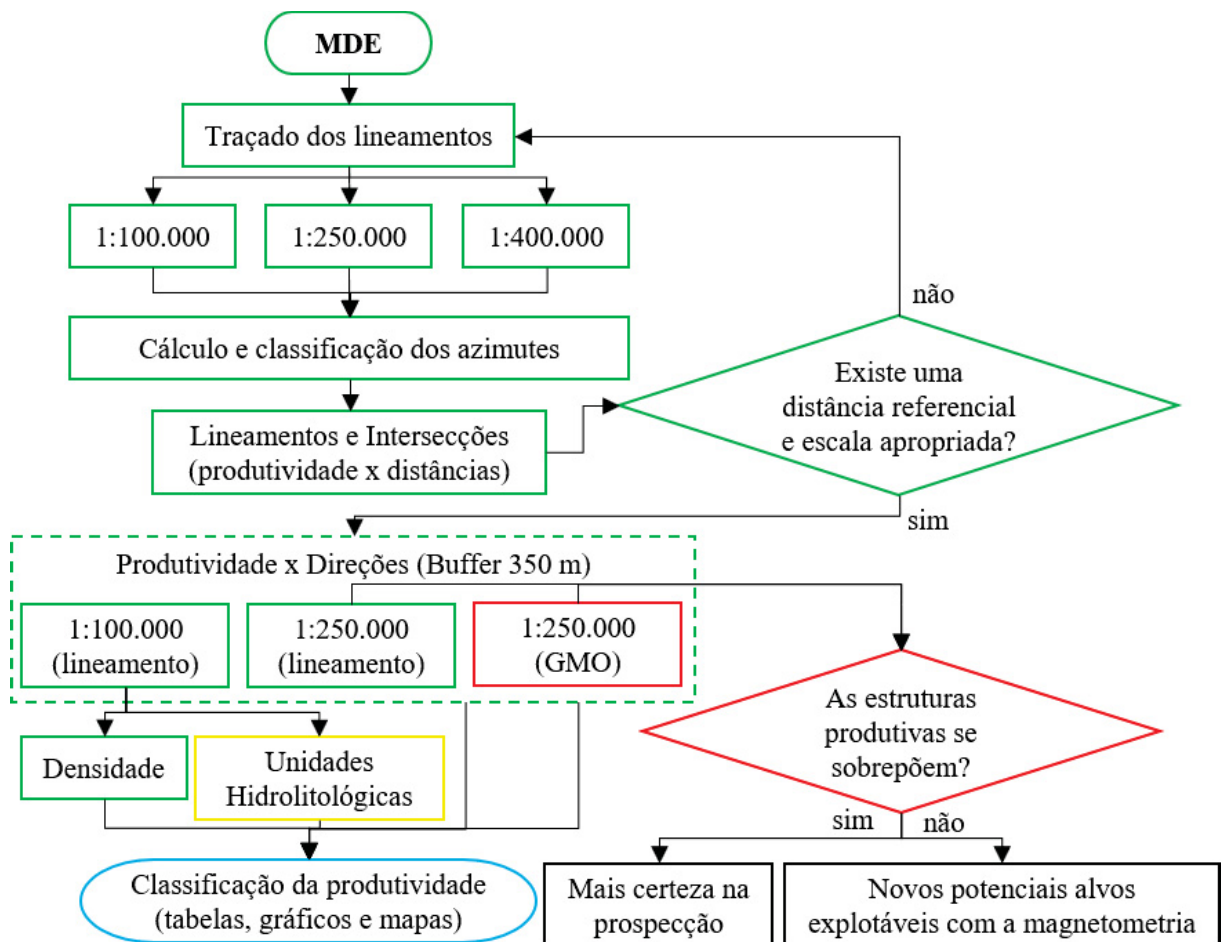


Figura 15 - Fluxograma das etapas de tratamento dos dados de produtividade hídrica associados aos lineamentos. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/analises SIG.

No cálculo dos azimutes foi utilizada a ferramenta *Add Geometry Attributes*. O resultado aparece na tabela de atributos do shape do lineamento em projeção azimutal (0 – 360°). Para melhor sistematizar esses valores, foram adaptadas duas fórmulas condicionais simples em linguagem python (e.g. *if*, *else* etc. - Figura 16) para reclassificá-los em notação de rumo, intervalados a cada 10°. Essas fórmulas foram inseridas na interface python que o próprio programa ArcGIS™ dispõe no *Field Calculator* da tabela de atributos do respectivo shape do lineamento.

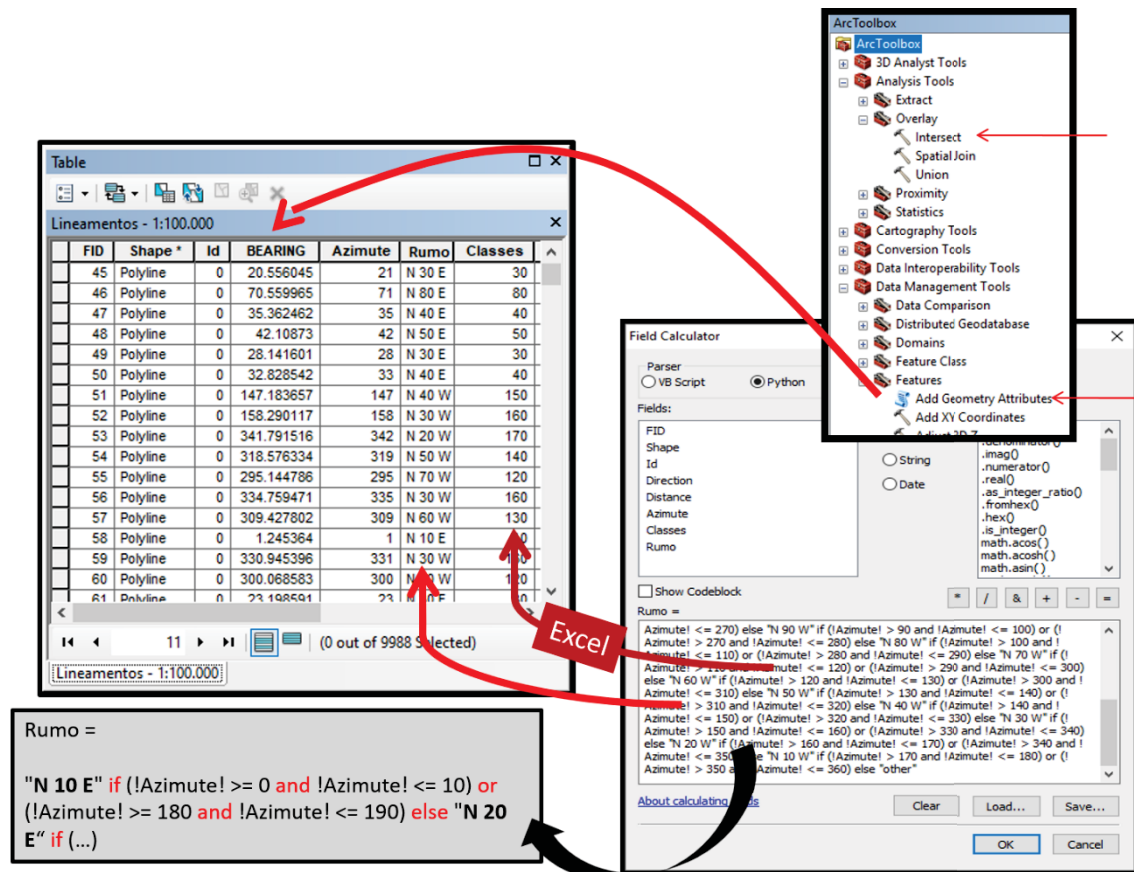


Figura 16 – Representação da interface Python - ArcGIS™ para inserção das fórmulas condicionais, cuja finalidade auxiliou nas reclassificações das direções dos lineamentos e na construção dos gráficos estatísticos de produtividade.

O primeiro código foi inserido em uma coluna nova do tipo “texto” (*text*) denominada “Rumor”, onde a coluna “bearing”, resultante do cálculo dos azimutes, é acionada matematicamente por meio do Equação 3 na tabela de atributos do shape de lineamentos. Essa fórmula prevê, por exemplo, que todos os valores entre 0° e 10° ou 180° e 190° sejam reclassificados em notação de rumor, isto é, “N 10 E”.

Equação 3

"N 10 E" if (!bearing! >= 0 and !bearing! <= 10) or (!bearing! >= 180 and !bearing! <= 190)
else (...)

A operação foi repetida (Equação 4) em uma outra coluna criada do tipo “número inteiro” (*short integer*) denominada “Classes”, sendo que, ao invés de inserir valores de rumor, foram inseridos valores entre 10° e 180°, ou seja, 18 classes numéricas para representar as 18 classes textuais dos rumos aqui apresentados entre N90W e N90E. A tabela de atributos desse shape de lineamento foi exportada para a planilha, onde essa coluna “Classes” foi colocada em

ordem ascendente para o cálculo das frequências acumuladas dos poços referentes à cada classe de direção separadamente, já que para o cálculo de frequências são permitidos apenas valores numéricos. Após o cálculo das frequências, foi possível calcular também as medianas das capacidades específicas para cada classe de direção.

Portanto, os valores da coluna “Rumo” foram inseridos nos gráficos de produtividade, enquanto que os da coluna “Classes” auxiliaram na organização dos dados e estatística na planilha. A partir de “else” apenas completou-se o código até concluir os 360°. Os códigos completos encontram-se nos apêndices do artigo (Apeendix 2 e Appendix 3).

Equação 4

"10" if (!bearing! >= 0 and !bearing! <= 10) or (!bearing! >= 180 and !bearing! <= 190) else
(...)

Para a análise da produtividade e o fator distância, foram utilizadas as ferramentas “buffer” (determinação da área de influência), sem dissolver as áreas de sobreposição, e “clip” (recorte dos poços nessas áreas) para duas modalidades aqui abordadas. A primeira modalidade trata-se do teste de diferentes buffers a partir do lineamento propriamente dito (Figura 17), intervalados em 50 m, entre 0 e 500 m. A segunda modalidade trata-se do teste de buffers a partir exclusivamente dos pontos das intersecções desses lineamentos (Figura 18), intervalados em 200 m, entre 0 e 2,000 m.

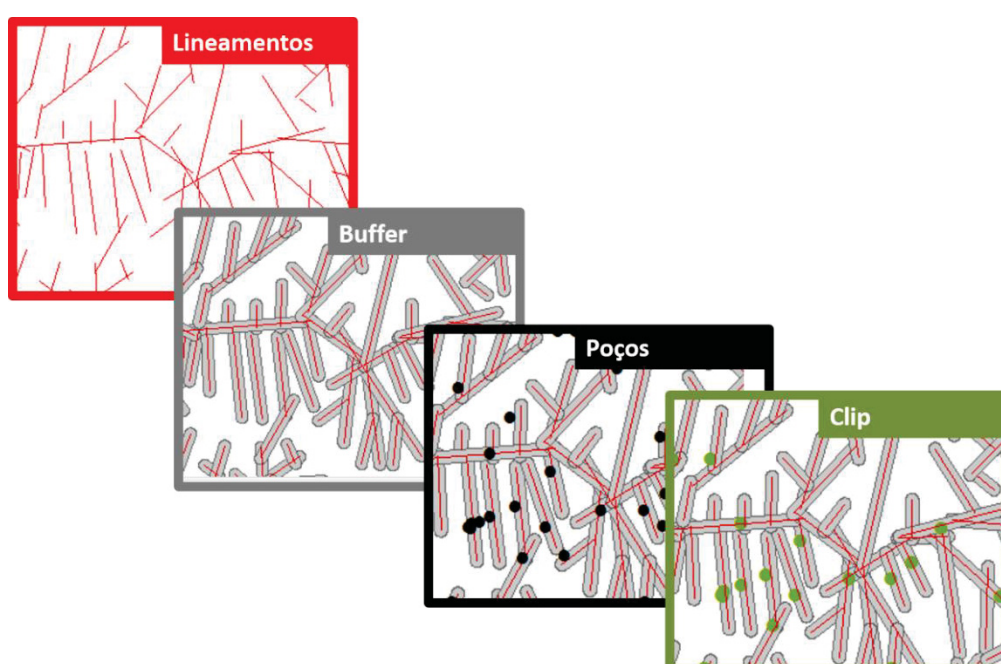


Figura 17 – Modelo esquemático dos buffers gerados a partir dos lineamentos.

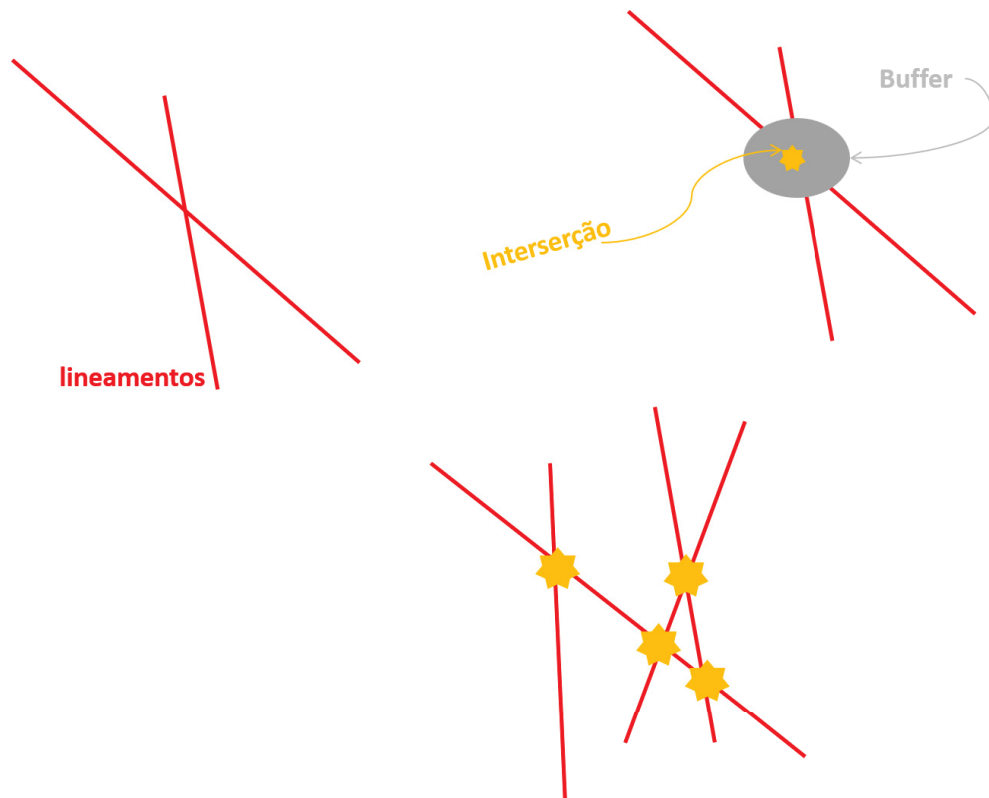


Figura 18 - Modelo esquemático dos buffers gerados a partir das intersecções dos lineamentos.

Para a análise da produtividade e as direções, foi utilizada uma distância referencial, a partir da análise anterior, para fazer uso do buffer correspondente. Esse buffer com essa distância referencial cumpre uma função similar à rotina do clip, devido ao recorte do poço nessa área de influência. A diferença nesta etapa é o resultado do recorte dos poços com o buffer, por meio da ferramenta “*intersect*”, que gerou um shape de pontos com as informações herdadas tanto do poço, quanto do lineamento (no caso os azimutes já reclassificados), para se poder fazer a análise desejada entre as direções e o parâmetro produtividade do poço.

É importante ressaltar que de acordo com esse método quando um poço é interceptado por mais de um lineamento (e.g. Figura 19), de diferentes classes de direções, a informação do poço repete em cada direção, enquanto que por meio da ferramenta clip os poços não se repetem. Essa repetição foi levada em conta pois entende-se que mais de um lineamento pode interferir na produtividade hídrica do poço.

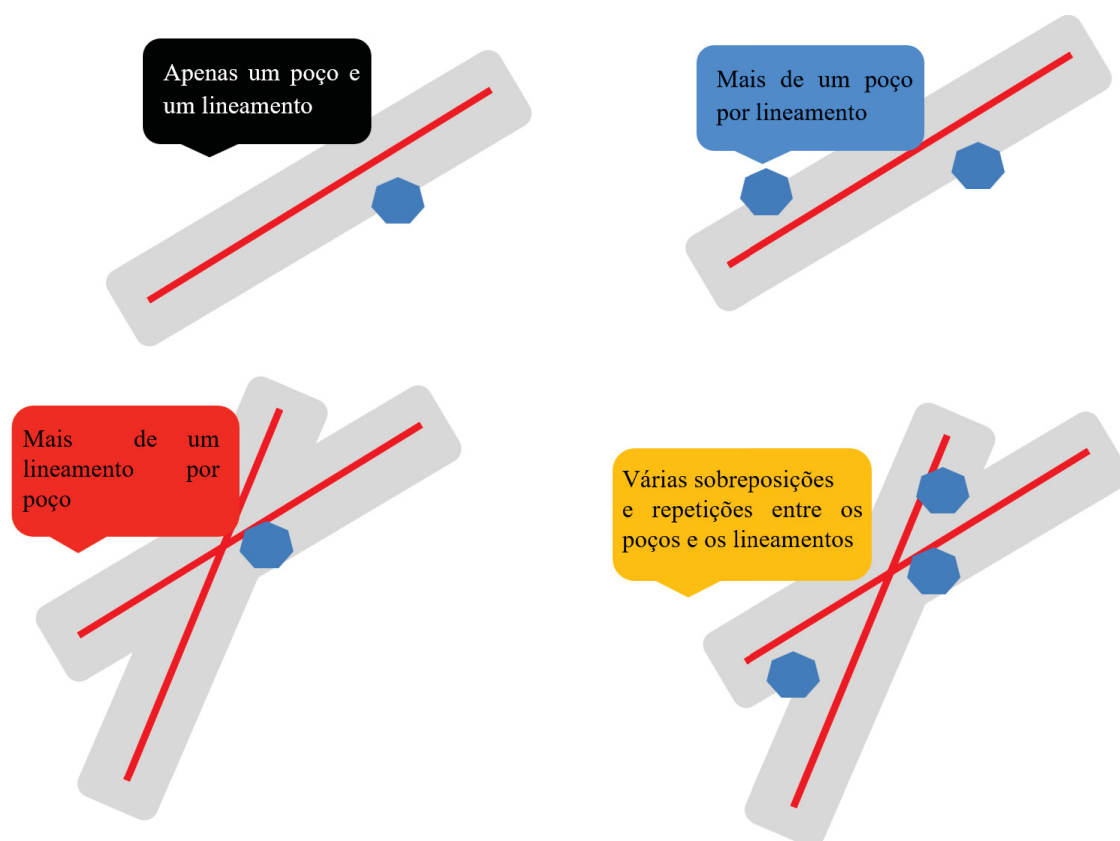


Figura 19 – Modelo esquemático da relação entre as possibilidades combinatórias de sobreposição entre os lineamentos e os poços.

Para a análise da produtividade e o fator densidade, foram gerados mapas de densidade kernel tanto para os lineamentos, quanto para os pontos de intersecção dos lineamentos. A área foi interpolada sem as áreas correspondentes à Serra do Mar e região costeira, devido ao alto padrão de densidade de estruturas que poderia mascarar o resultado. Esse recorte foi feito por meio da ferramenta “*erase*”.

O mapa raster resultante foi reclassificado, por meio da ferramenta “*reclassify*”, em valores de quartis, a partir do qual foi realizado o recorte dos poços por meio da ferramenta “*extract values to points*”. A tabela de atributos do shape gerado após essa operação foi exportada para a planilha, calculada a frequência acumulada e a produtividade dos poços para cada quartil.

3.3 ANÁLISE QUALITATIVA E SEMIQUANTITATIVA DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS

Os dados aeromagnetométricos são originários do novo projeto 1095 Paraná - Santa Catarina ((CPRM, 2011) <http://geosgb.cprm.gov.br>), definido por linhas de voo de direção N-

S separadas em 500 m, linhas de controle E-W de 10.000 m e altura nominal de 100 m (Figura 20). O processamento foi realizado com o programa Oasis Montaj™ v. 9.4.



Figura 20 - Projeto Aerogeofísico 1095 Paraná - Santa Catarina, em vermelho (CPRM 2011).

Vale ressaltar que o antigo aerolevantamento da região, correspondente ao projeto 1025 que data de 1978 (CPRM, 1978), possui uma resolução inferior aos novos dados publicados em 2011 (Figura 21). As características de voo são definidas pelas linhas de voo de direção NW-SE, separadas em 1 km, linhas de controle de direção NE-SW, separadas em 20 km, e altura de voo de 150 m.

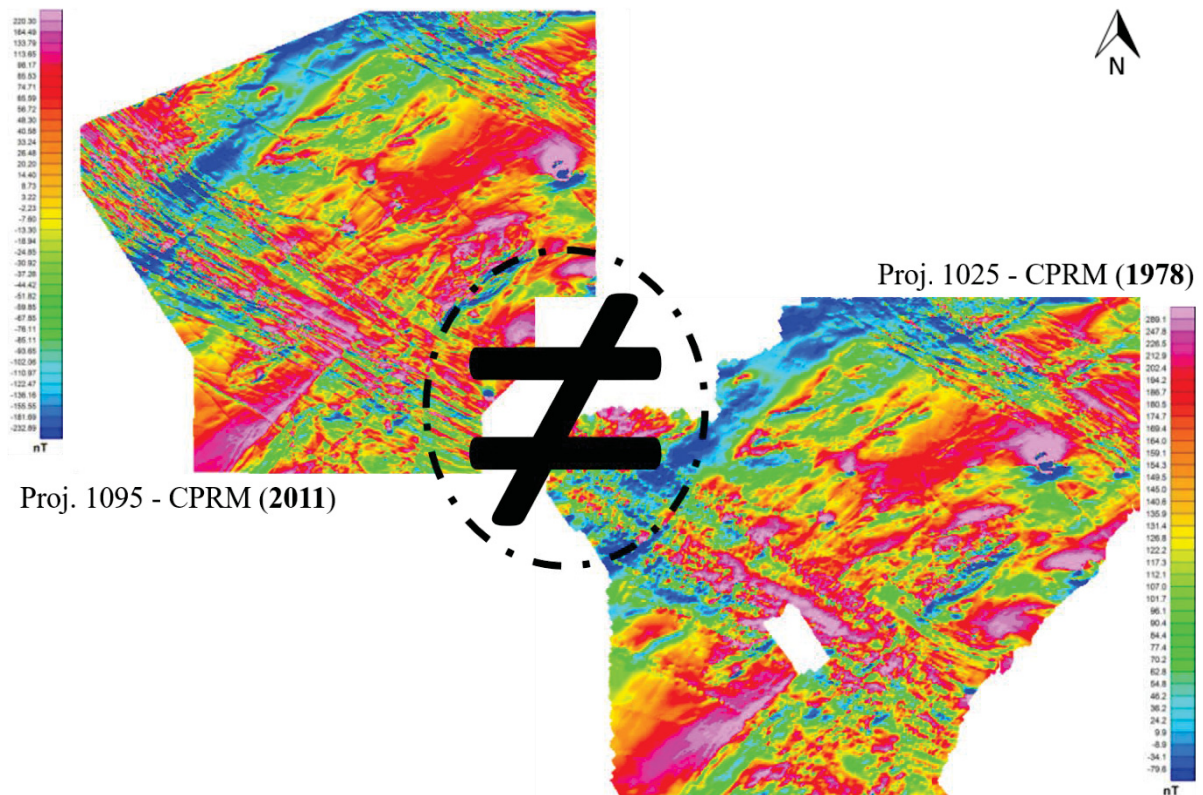


Figura 21 – Comparação entre os dois diferentes aerolevantamentos magnéticos correspondentes à região de estudo (modificado de CPRM, 1978, 2011)

Para as técnicas de realce das estruturas (Figura 22), isto é análise qualitativa, foram calculados dois campos magnéticos anômalos (CMA). O primeiro grid CMA¹ foi gerado a partir da técnica de interpolação bi-direcional (Geosoft, 2014) do canal magnético, já corrigidos para o modelo geomagnético internacional (IGRF), com 100 x 100 m de células de grid. Os limites do grid aeromagnético foram recortados para além dos limites do SAEC para evitar efeitos de borda durante o processamento.

O segundo grid (CMA²) corresponde ao CMA¹ aplicado um filtro de cosseno direcional (CD) (Geosoft, 2014), de forma a realçar estruturas NE-SW e minimizar as fortes influências magnéticas de direção NW-SE, correlatas ao Enxame de Diques do Arco de Ponta Grossa de mesma direção.

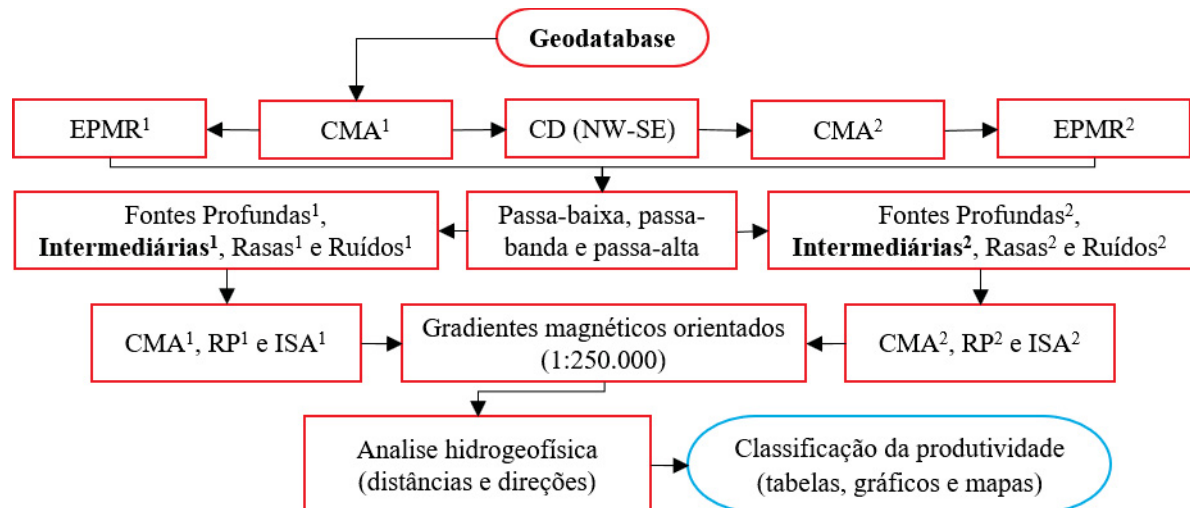


Figura 22 - Fluxograma das etapas do tratamento dos dados aeromagnéticos. As caixas coloridas referem-se aos dados: vermelho – geofísico; verde – MDE; amarelo – geológico; azul – poços; preto – produtos/analises SIG.

Para cada CMA, foi calculado o espectro de potência medido radialmente (EPMR) com base na Equação 5, a partir da qual foi possível realizar uma análise semiquantitativa, ou seja, estimar a profundidade das diferentes fontes magnéticas. A Figura 23 representa um modelo esquemático dessas diferentes fontes. Os valores gerados na Equação 5 foram inseridos nos filtros passa baixa, passa banda e passa alta (Spector e Grant, 1970; Milligan e Gunn, 1997; Geosoft, 2009) para a escolha do mapa base que serviu para as etapas subsequentes.

Equação 5

$$U = (1/k) * 10^3$$

Onde “k” é o número de ondas (ciclos/km); “10³” é a constante utilizada para transformação entre as unidades de quilômetros para metros, necessária para a inserção nos filtros do programa; e “u” é “unidades de terreno” (m), que são os valores a serem manipulados nos filtros apropriados.

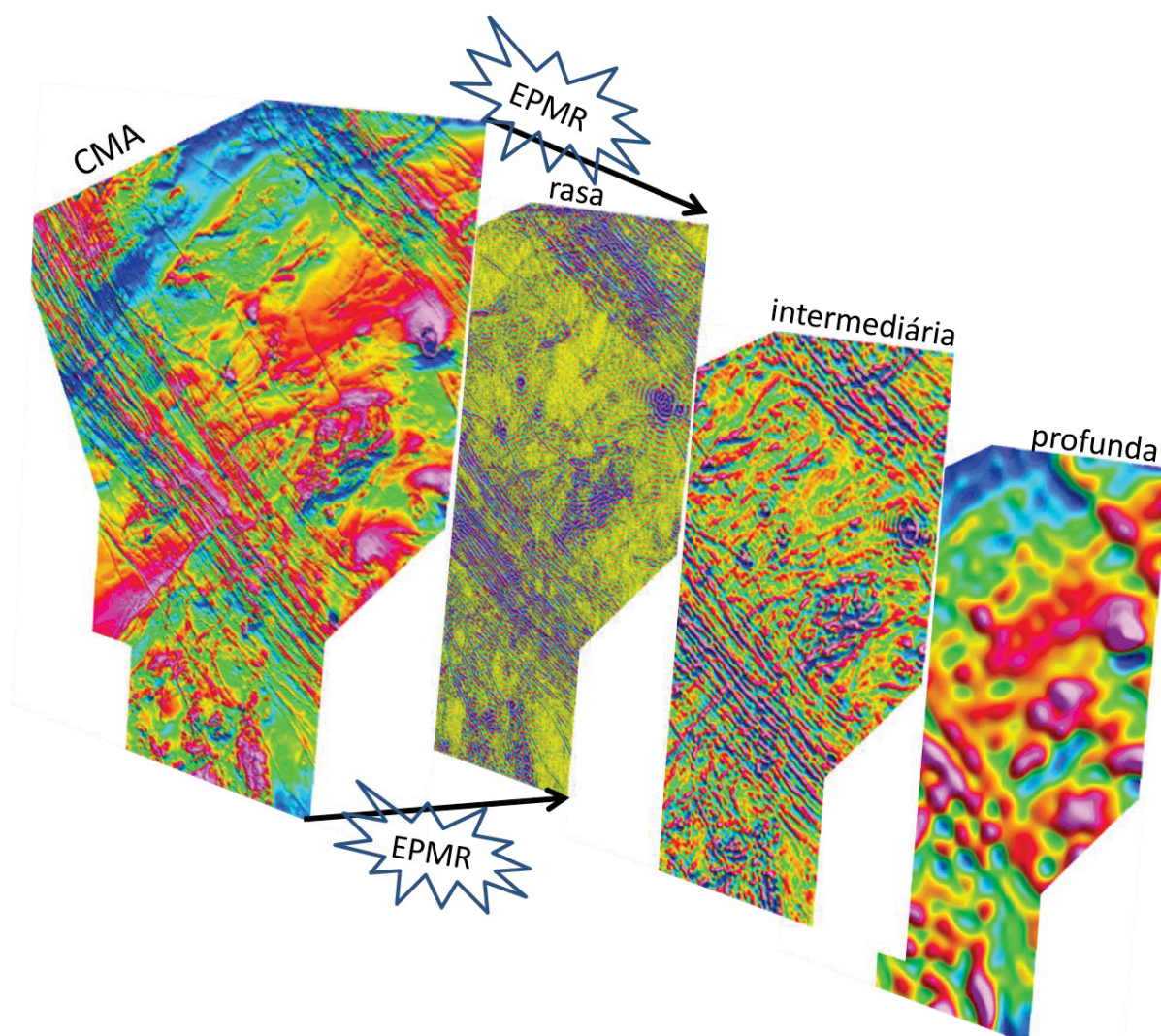


Figura 23 – Modelo esquemático para as diferentes fontes magnéticas geradas a partir do cálculo do espectro de potência medido radialmente (EPMR).

Dentre as fontes magnéticas estimadas, as fontes intermediárias foram escolhidas para aplicação do filtro de redução ao polo (RP) e subsequentemente o filtro de inclinação do sinal analítico- ISA (Miller e Singh, 1994) para realce de gradientes alongados e de borda de corpos magnéticos. Os grids derivados desses filtros serviram de base para a extração dos gradientes magnéticos orientados (GMOs) na escala 1:250.000. A base conceitual de dados potenciais magnéticos é revista em Blakely (1995) e Kearey et al. (2002).

Os GMOs gerados nesta etapa também passaram pela rotina dos cálculos dos buffers, clips e azimutes relacionados à produtividade hídrica dos poços.

3.4 PRODUTIVIDADE DAS UNIDADES HIDROLITOLÓGICAS

O mapa geológico utilizado neste trabalho é oriundo do banco de dados do Serviço Geológico do Paraná na escala de 1:650.000 sob o formato *shapefile* (MINEROPAR, 2006). Uma síntese regional desse mapa é apresentada na Figura 10 conforme a literatura (Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018; Patias et al., 2019).

A produtividade hídrica dos poços localizados nas diferentes rochas foi analisada por meio da ferramenta “*intersect*” no ArcGISTM. Posteriormente os dados foram tratados em planilhas e gráficos de frequência acumulada para analisar as tendências de produtividade das unidades litológicas baseado em valores de capacidade específica distribuídas entre os quartis.

Após a verificação da produtividade por unidade litológica, foram recortados e separados os lineamentos da escala 1:100.000 para cada unidade litológica também, a fim de discriminar as direções preferenciais dentro dessas unidades. Isso permitiu diferenciar a análise de produtividade em escala regional, entre terrenos, a uma escala mais local, entre as litologias.

Por fim, com base nas estimativas de produtividade dos litotipos, foi proposto um mapa de unidades hidrolitológicas.

4 RESULTADOS

Artigo submetido ao Hydrogeology Journal.

4.1 PAPER - LITHO-STRUCTURAL CONDITIONING EXPLORATION OF FRACTURED AQUIFERS: A CASE STUDY IN THE CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFER SYSTEM, BRAZIL

Abstract.

This research aimed to identify qualitatively and quantitatively productive regions through spatial correlations of wells and geological conditions, such as lineaments, hydrography, aeromagnetometry and different lithologies present in the Crystalline Basement Aquifer System (CBAS), state of Paraná, Brazil. The novelty lies on the enhancing techniques to the airborne magnetic data and the choice of the optimum features extraction scale, nevertheless it can be replicated to any crystalline aquifer. The median productivity of the 224 wells analyzed is 0.29 m³/h/m. Under a multi-scale regional assessment (1:400,000, 1:250,000 and 1:100,000), the results showed that the best condition is associated with: the distance of 350 m from the lineaments, especially those with directions N40W, N10E and N70E. Considering hydrolithological units, gneisses are the most productive, especially where lineaments coincide with regional structures, such as shear zones, foliations and cenozoic tectonic reactivations. Quartzites, granitoids, schists, phyllites, and rhyolites were also favorable when close to important rivers and not necessarily coinciding with regional lineaments, high density, either vertical fractures. The areas of intersection of the lineaments did not serve as a discriminatory parameter in this research. As the median depths of the water wells reach 90 m from surface, the extraction of oriented magnetic gradients referred to magnetic sources down to 800 m depth, thus corroborating surface mapped lineaments and new non-outcropable structures. The geoprocessing tools applied to the geological and geophysical data proved to be important in discriminating specific exploratory conditions in each hydrolithological unit, to minimize the exploratory risk in CBAS.

Keywords: Hard rock aquifer, groundwater productivity, multi-scale lineaments, geospatial analysis, hydrogeophysics

1. INTRODUCTION

The Crystalline Basement Aquifer System - CBAS (Brasil, 2015) is a fractured aquifer system (Feitosa et al., 2008; Diniz et al., 2014) comprising an area of approximately 24,000 km² located in the state of Paraná, in the southern region of Brazil. More precisely, the CBAS (Figure 1) is a part of the outcropping portion of the Paraná Basin's crystalline basement (Almeida et al., 1977) and correlated with geomorphological features of the First Paraná Plateau after Maack (1947).

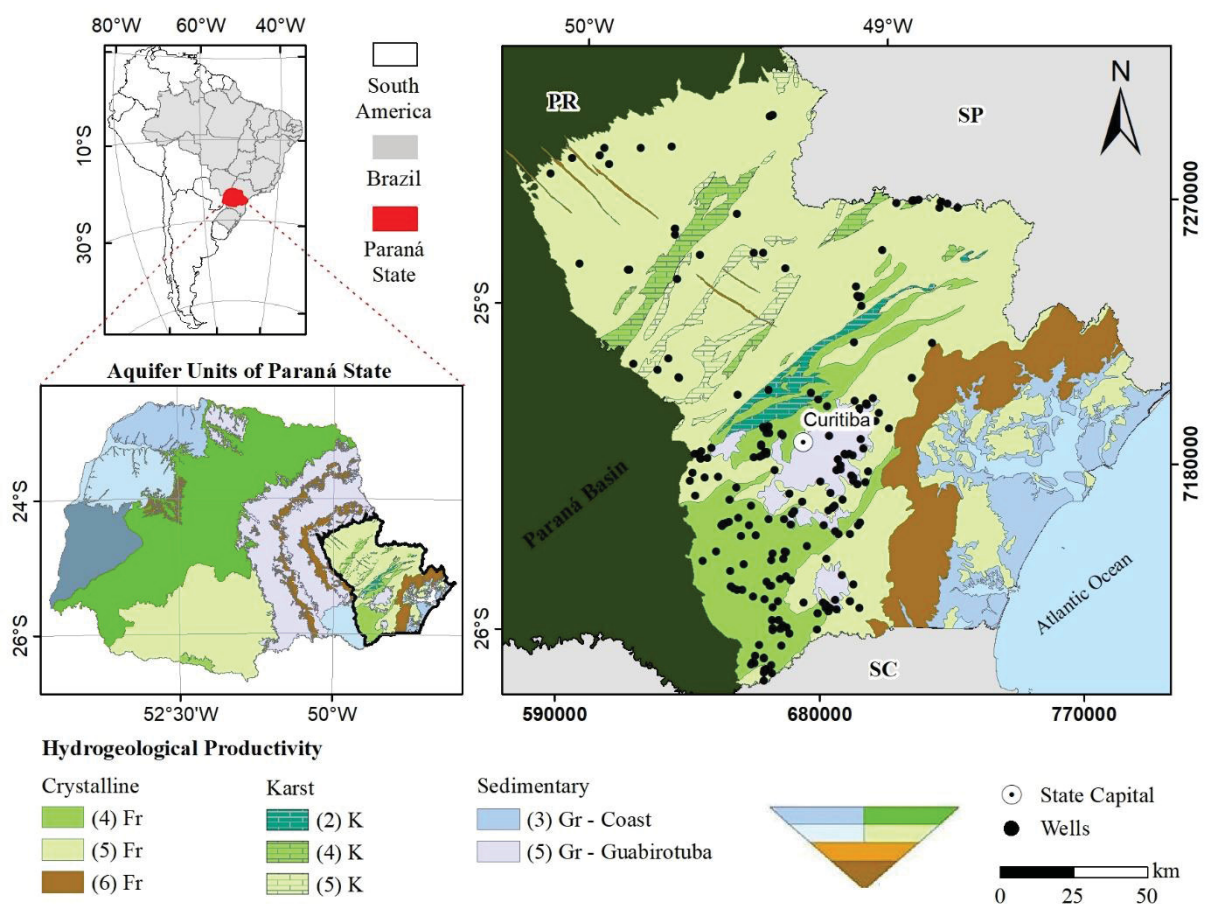


Figure 1 - Crystalline Basement Aquifer System location (area of study), wells used in research and productivity indexes in the aquifer regions (adapted after Brasil, 2015). Aquifer's colors (saturation) and numbers in parenthesis refer to international standard in UNESCO (1983) and Struckmeier and Margat (1995): aquifer type green – fractured (Fr); hatched green – karst (K); blue – intergranular (Gr); brown – no aquifer; production index (6) fairly unproductive/no aquifer; (5) very low; (4) low; (2) high.

Previous studies have related the water productivity in crystalline terrains to lithostructural conditions and the specific cenozoic tectonics in each region, with examples from the state of São Paulo (Fernandes and Rudolph, 2001; Neves and Morales, 2007a, 2007b; Alves, 2008; Madrucci et al., 2008; Fernandes et al., 2011, 2016); Rio Grande do norte

(Coriolano et al., 2000); Ceará (Souza Filho, 2008; Friedel et al., 2012). In Paraná, the same considerations were made by Athayde (2013)) for the volcanic spills of the Serra Geral Aquifer System and by Chavez-Kus and Salamuni (2003, 2008b) referring to the Atuba Complex, in the crystalline portion of the regional metropolitan area of Curitiba, capital of the state of Paraná.

It is important to highlight that the structures parallel to sigma 1 are theoretically the most open, corresponding to the type T fractures of the Riedel Shear model (Ramsay and Graham, 1970; Fossen, 2016), which would allow more percolation and water storage (Chavez-Kus and Salamuni, 2008a; Fernandes, 2008).

The motivation for this research comes from the importance of several regions, with strong economic potential in the country, to demand water from this type of aquifer, whether for domestic, agricultural or industrial use, which also enhances the need to promote this study. These regions include the state of Rio de Janeiro, with 80% of area of its aquifers in crystalline terrain (Barreto et al., 2000; Martins et al., 2006); the state of São Paulo with 37% of area of its aquifers in crystalline terrain and where are some of its important industrial regions such as Sorocaba, Campinas, and Greater São Paulo (Fernandes et al., 2005); and the state of Paraná with 10% of area of its aquifers in crystalline terrain, including the capital Curitiba (Brasil, 2015).

In addition to demand, the unpredictability of water productivity is a major factor in terms of the exploratory risks for crystalline aquifers. We assume that this unpredictability is largely due to the lack of knowledge of geological evolution and pre-existing geological discontinuities.

Thus, the goal of this work is to define the lithostructural conditions that contribute to the water well productivity in order to reduce the exploratory risk across crystalline terrains in Brazil. To this end, we studied the possible spatial correlation between well water productivity, lithology, lineaments, and oriented magnetic gradients. Multicriteria techniques were used to indicate areas with better productivity rates.

2. GEOLOGICAL SETTING

The study area (Figure 2) has a geological context of Pre-Cambrian igneous and metamorphic rocks predominantly structured towards NE-SW, and NW-SE Juro-Cretaceous structures corresponding to the dikes of the Ponta Grossa Arch - PGA. The tectonic framework corresponds to the southern portion of the Ribeira Belt, with its accretionary terrains: Apiaí

Terrane (AT), Curitiba Terrane (CT), Paranaguá Terrane (PT) and Luis Alves Microplate (LAM) (Campos Neto, 2000; Heilbron et al., 2008; Castro and Ferreira, 2015; Passarelli et al., 2018).

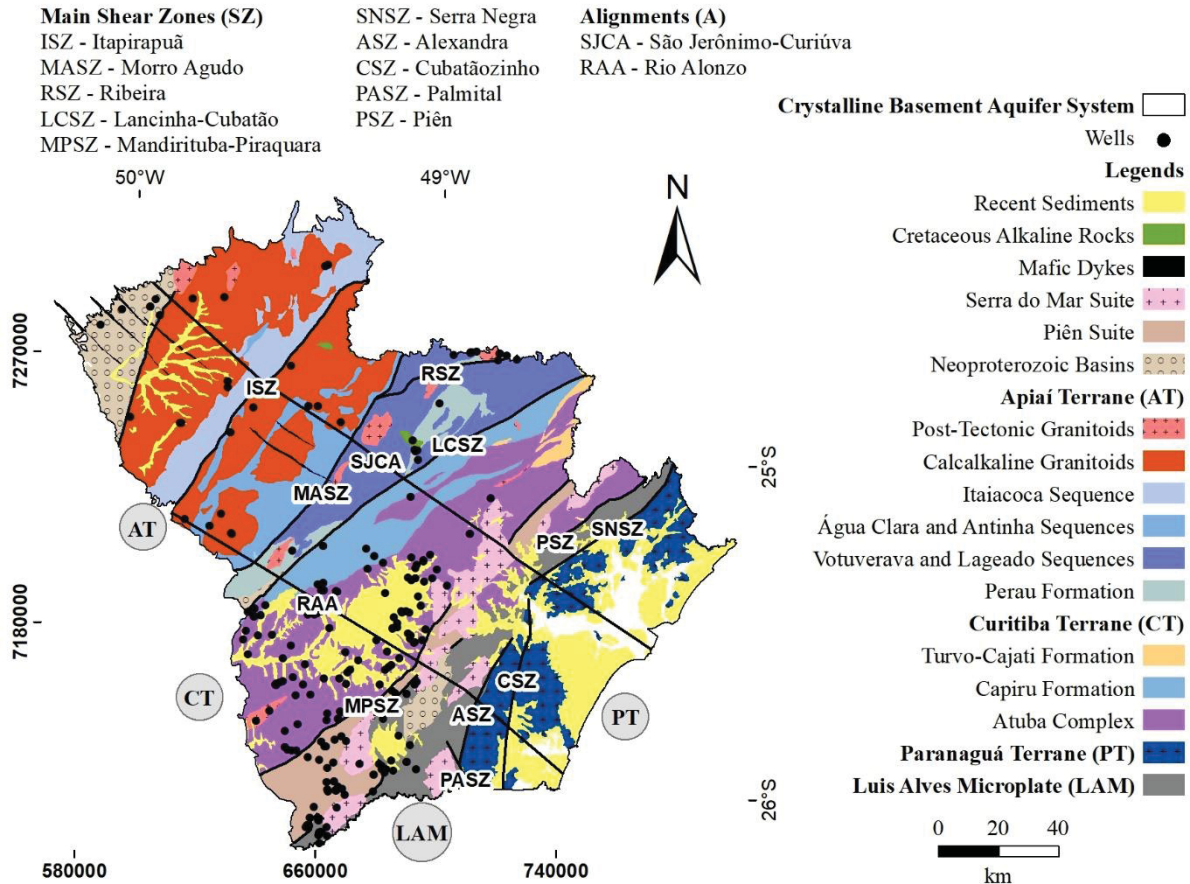


Figure 2 – Synthesis of the geological map of the outcrop portion of the basement of the Paraná Basin limited to the state of Paraná (adapted after Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; MINEROPAR, 2006; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018; Patias et al., 2019).

The Apiaí Terrane is made up of Paleoproterozoic granitoid rocks (Siga Júnior et al., 2005), and low metamorphic grade metasedimentary and metavolcanic rocks, such as metarenites, metaconglomerates, schists, quartzites, and phyllites, from Meso to Neoproterozoic ages (Basei et al., 1992; Siga et al., 2009). In the Neoproterozoic, the Apiaí Terrane was affected by a calc-alkaline magmatism that constitutes the granitoids of the Três Córregos, Agudos Grandes and Cunhaporanga batholiths (Guimarães, 2000; Prazeres Filho, 2005). Finally, sediments and volcanic Neoproterozoic-Ordovician rocks were deposited in the Castro Basin evolved in a post-tectonic extensional context, where they formed acidic to intermediate volcanic rocks interspersed with conglomeratic / sandstone and pelitic metasedimentary rock (Basei et al., 1998a; Campanha and Sadowski, 1999).

The Curitiba Terrane consists of Paleoproterozoic migmatitic orthogneissic rocks from the Atuba Complex (Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; Salamuni et al., 2003). Metasedimentary rocks such as phyllites, schists, and quartzites from the Turvo-Cajati, Setuva and Capiçu formations cover part of the northeast and southwest portion of Atuba Complex (Basei et al., 2008). This terrane was intruded by anorogenic granites from the Serra do Mar Suite during the Neoproterozoic (Siga Júnior et al., 1999; Basei et al., 2009; Siga et al., 2009).

Over the Curitiba Terrane, the Guabirotuba Formation was developed in the Curitiba Basin (Salamuni et al., 2003), which is related to the Cenozoic Rift System of Southeast Brazil (Zalán and Oliveira, 2005). The Guabirotuba Formation comprises immature pelitic and sandy sediments and gravels, the latter are more restricted to the edges of Curitiba Basin (Lima et al., 2013).

The Apiaí and Curitiba Terranes are separated by the Lancinha-Cubatão Shear Zone (LCSZ) with northeast-southwest orientation (Basei et al., 1992; Campanha, 2002). It is a mega-structure, with the dextral sense of displacement estimated between 100 and 140 km and that extends for about 150 km within the Paraná territory. Castro et al. (2014) suggest depths of up to 1 km for the fault and sigmoidal patterns for its damage zone, however part of its magnetic signal may have lost expression due to the subsequent tectonic events.

The Luis Alves Microplate is made up of granulitic orthogneisses, locally migmatized during Archaean and Paleoproterozoic times. Subordinately metavolcano and metasedimentary rocks, also alkaline to peralkaline Neoproterozoic granitoids (Basei et al., 1998b; Passarelli et al., 2018).

The Curitiba Terrane and Luis Alves Microplate are separated by the Piên Shear Zone (PSZ), with northeast-southwest direction (Siga Junior et al., 1995). This shear zone is interpreted as an magmatic arc subducted to the northwest direction, which gave rise to a granitic belt and the mafic-ultramafic Piên Suite (Basei et al., 2000; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018).

The Paranaguá Terrane consists of granite suites associated with shear zones and they have intruded meta-sedimentary rocks and the Paleoproterozoic basement gneiss. Those rocks were experienced migmatization in the Neoproterozoic (Siga Junior et al., 1995; Patias et al., 2019). The Paranaguá Terrane has boundaries with the Luis Alves Microplate through the Alexandra, Palmital and Serra Negra Shear Zones from NNE-SSW to NE-SW.

3. MATERIAL AND METHODS

This work addresses the issue of geological constraints for prospecting groundwater on a regional scale, based on multicriterial and multi-scale analysis of parameters. This systematization starts with the processing of water productivity data from wells, digital elevation models (DEMs), aeromagnetometric data and mapped lithology, followed by statistics and geoprocessing, resulting in maps and productivity graphs of the Crystalline Basement Aquifer System (Figure 3).

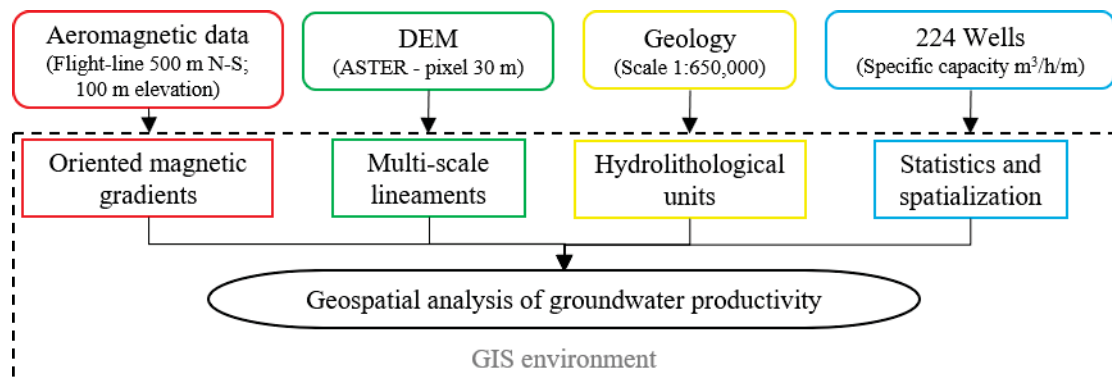


Figure 3 – General flowchart with the synthesis of stages this work. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.

For the geospatial analysis of productivity, we used the tools in ArcGISTM v. 10.6.1 software. The products as maps are referenced to the SIRGAS 2000 Datum displayed as geographic and UTM / 22s Zone coordinates.

3.1 Well database

Initially, 236 tubular wells were selected from the database of the Carta das Águas do Paraná (Brasil, 2015). Data for the majority of these wells was provided by the Water and Waste Management State Company, SANEPAR and some from the State Water Agency, AGUASPARANÁ. Twelve wells were excluded because they were either (1) outside the CBAS' predicted boundary; (2) drilled on sedimentary terrane; or (3) located in the coastal region, which has few wells and exhibits a different climatic regime from the study area which is located on the highland. Therefore, 224 wells were organized using univariate statistics (Figure 1). For consistency, all of these wells have standardized pumping tests for a 12 h period. The analysis of productivity (specific capacity and yield) and depth of the well were spatialized and treated under percentile, median and accumulated frequency scales.

3.2 - Treatment of multi-scale lineaments in Digital Elevation Model (DEM)

The definitions of lineament used in this work follow O’Leary and Friedman (1978): “linear, mappable, simple or composite feature, aligned in a straight or slightly curved manner”. These features may represent foliations of metamorphic rocks, sedimentary layers, fractures or other geological discontinuities of the basement, being mainly vertical or sub-vertical (Tirén, 2010). Our methodological approach could not study the influence of horizontal-to-sub-horizontal fractures, although we recognize their importance from some well-log records and at outcrop occurrences.

The systematic processing of the lineaments is present in Figure 4. Multi-scale lineaments were manually drawn from DEM, derived from images from the ASTER sensor, with a resolution of 30 m (USGS, 2018). The tracing scales were 1:100,000, 1:250,000 and 1:400,000, with pseudo-illuminations at angles 45°, 135°, 225°, and 315°. The variations of these angles sought to highlight different geomorphological structures in a perpendicular way. The digitalization of the guidelines occurred with the fixed scales, in order to maintain the coherence of the photo-interpretation (Fernandes, 2008).

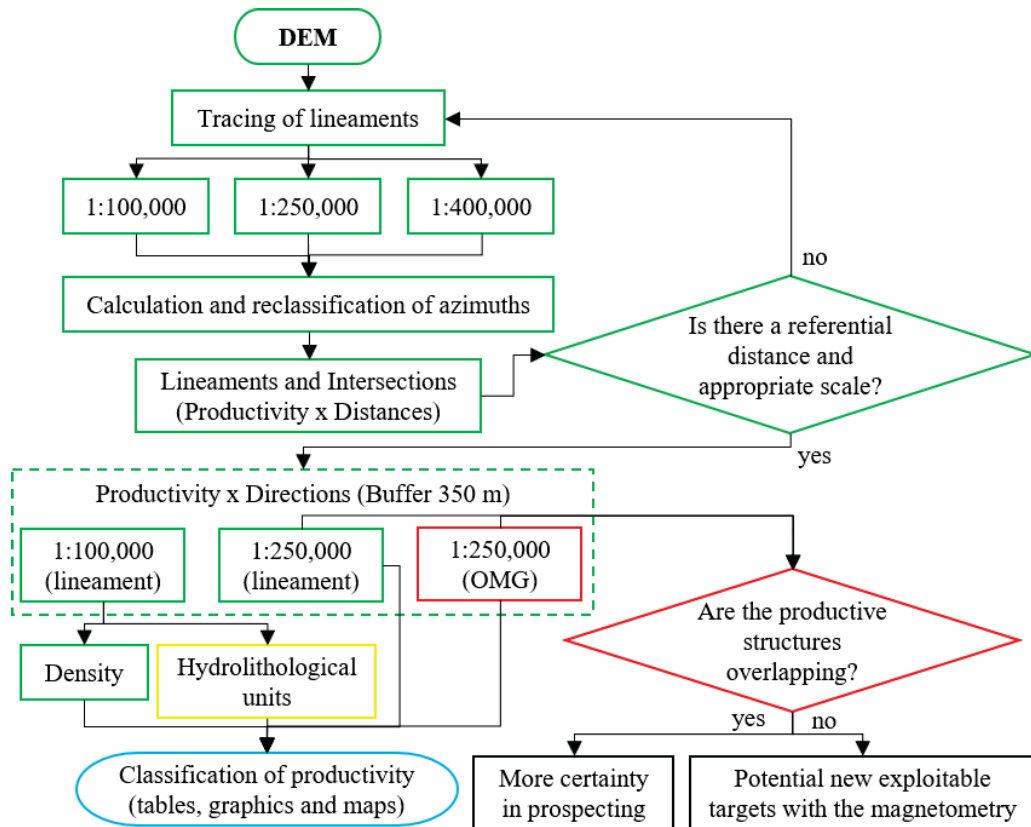


Figure 4 – Flowchart of the stages for processing water productivity data associated with the lineaments. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.

The tracing of the lineaments was performed preferably on the negative features of the relief, given the potential for the recharge that these features of the relief may have, to the detriment of the ridges (Feitosa et al., 2008). In addition, there was a generalization of lineaments whose angles showed difference of $< 10^\circ$, to avoid statistical overestimation (Chavez-Kus and Salamuni, 2008a).

The lineaments were digitized in the software ArcGISTM v. 10.6.1 as shapefile format. The well productivity analyzes involving the lineaments took into account the distance, direction, and density.

Therefore, for the azimuth calculation, we used the *Add Geometry Attributes* tool, resulting in a attribute table of the lineament shapefile in azimuth projection ($0 - 360^\circ$). Subsequently, the lineaments were reclassified at 10° intervals, using Equation 1 inserted in the *Field Calculator* (Python interface - ArcGIS), generating course notations (e.g. “N10E”).

Equation 1

$$\text{"N 10 E" if (!bearing!} \geq 0 \text{ and !bearing!} \leq 10) \text{ or (!bearing!} \geq 180 \text{ and } \\ \text{!bearing!} \leq 190) \text{ else (...)}$$

To assist in calculating the productivity of the directions in spreadsheets, a second operation (Equation 2) was repeated in a new column of the attribute table of shapefile called “Classes”, generating 18 classes of intervals between 10° and 180° to represent the 18 textual classes of the directions presented here between N90W and N90E. The complete codes (Equations 1 and 2) comprise the supplementary material of this article.

Equation 2

$$10 \text{ if (!bearing!} \geq 0 \text{ and !bearing!} \leq 10) \text{ or (!bearing!} \geq 180 \text{ and !bearing!} \leq \\ 190) \text{ else (...)}$$

For the evaluation of productivity associated with each direction class, we identified a proximity zone, in which the median productivity of all wells within that zone is calculated. The attributes table of this lineament shapefile was exported to an electronic spreadsheet where graphs of accumulated frequency were constructed to allow comparison of lineament azimuth classes with specific capacity of wells.

The productivity analysis against a distance factor was two-fold. First, we applied the proximity tools “*buffer*” (area of influence) to lineaments, without dissolving the overlapping

areas, and we clipped the wells inside these areas. The first modality was the test of different buffers from the lineament itself, with intervals of 50 m, covering a range of from 0 to 500 m. The second modality tested buffers around the lineaments intersections points, spaced every 200 m, from 0 to 2,000 m away from the point.

About the relation between productivity and directions, a reference distance (as buffer) was chosen from the most meaningful productivity distance evaluated in the previous steps. Then, the “*intersect*” tool created a shapefile of points with information inherited from both the well and the lineament (in this case, the azimuths already reclassified) files. We exported the attribute table of this new point shapefile generated to spreadsheet for the calculating the productivity.

According to this method, when a well falls within more than one buffer zone, in different classes of directions, the well information is repeated in each direction, as we understood that more than one lineament can interfere on the well productivity. The calculation of the azimuth values of the lineaments in the rose diagram was performed with the *AzimuthFinder* tool (Queiroz et al., 2014), installed as an extension in *ArcToolbox*, and the rose diagram was generated with the software OpenStereo v. 0.1.2 (Grohmann and Campanha, 2010).

Regarding productivity and the density factor, kernel density maps were generated for both the lineaments and intersection points of the lineaments. The processed area was the first plateau, and we excluded the areas corresponding to the Serra do Mar range and the coastal plains, due to scarce number of wells which may bias the comparison.

The resulting raster map was reclassified, using the “*reclassify*” tool, into quantile values, from which the wells were cut using the “*extract values to points*” tool. The shape attribute table generated after this operation was exported to the spreadsheet, calculating the cumulative frequency and productivity of the wells for each quantile.

3.3 Aeromagnetic data

The aeromagnetometric data used in this study was generated by the Paraná - Santa Catarina 1095 project (CPRM, 2011), in which the survey design had N-S flight lines separate by 500 m, E-W control lines spaced 10,000 m apart and elevation of 100 m draped over the topography. Processing was performed in Oasis MontajTM v. 9.4 software.

Regarding qualitative analysis, we applied techniques of structural enhancement (Figure 5), on two types of total magnetic anomalous field (TMA). The first TMA¹ grid was

generated using the bi-directional interpolation technique (Geosoft, 2014) of the magnetic channel, already corrected for the international geomagnetic model (IGRF, considering the magnetic declination -18°25' and inclination -34°52' for center of the area), with 100 x 100 m of grid cells. The limits of the aeromagnetic grid were beyond the limits of the CBAS to avoid edge effects during processing.

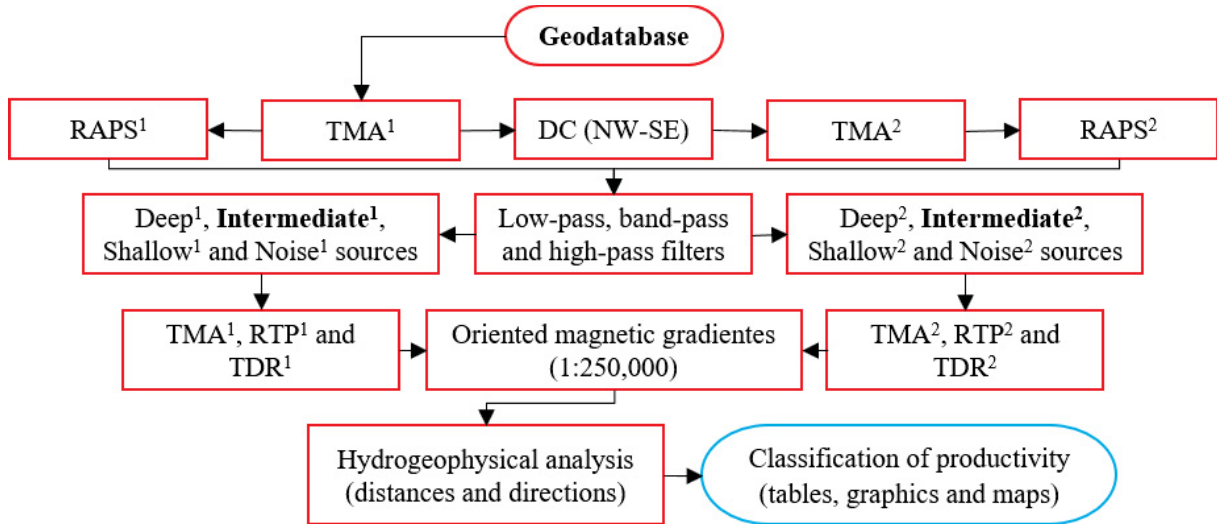


Figure 5 – Flowchart of the stages for the treatment of aeromagnetic data: treatment from an initial geodatabase, gridding, qualitative analysis (enhancement techniques - filters) and semiquantitative (depth estimation), geospatial analysis of productivity of oriented magnetic gradients and method validation. Colored boxes refer to data: red – geophysics; green – DEM remote sensing; yellow – geologic; blue – water-wells; black – GIS analysis/products.

The second grid (TMA²) corresponds to the TMA¹ applied to a directional cosine filter (DC) (Geosoft, 2014), to highlight NE-SW structures and minimize the strong magnetic influences of NW-SE direction, related to the swarm of dykes of the Ponta Grossa Arch in the same direction.

For each TMA the Radially Average Power Spectrum - RAPS was calculated (Equation 3), to identify the depth of the main magnetic sources. Using low-pass, band-pass and high-pass filters (Spector and Grant, 1970; Milligan and Gunn, 1997; Geosoft, 2009) of different depth ranges to the magnetic sources (semi-quantitative analysis) were separated.

Equation 3

$$U = (1/w) * 10^3$$

Where “w” is the wavenumber (cycles/km); “10³” is the constant used for transformation between units from kilometers to meters, necessary for insertion filters

parameters; and "U" is "land units" (m), which are the values to be manipulated in the appropriate filters.

Among the estimated magnetic sources, the intermediate sources were chosen to apply the pole reduction filter (RTP filter) and subsequently the Tilt Derivative filter - TDR (Miller and Singh, 1994) to enhance elongated gradients and the edge of magnetic bodies. The grids derived from these filters served as the basis for the extraction of oriented magnetic gradients (OMGs) in scale 1:250,000. The conceptual base of potential magnetic data is reviewed in Blakely (1995) and Kearey et al. (2002).

Similar to the procedure outlined in Section 3.2, the generated OMGs also went through the routine of buffer creation (350 m), clipping of wells within buffers, azimuths reclassification and to be later correlated with well productivity.

3.4 Geological map

The geological map used in this work is based on the database of the Paraná Geological Service on a scale of 1:650,000 under the shapefile format (MINEROPAR, 2006). A regional synthesis of this map is presented in Figure 2 (Basei et al., 1992; Siga Junior et al., 1995; MINEROPAR, 2006; Heilbron et al., 2008; Passarelli et al., 2018; Patias et al., 2019).

The productivity of wells located in the different geological units was assessed with the “*intersect*” tool in ArcGIS. Subsequently, the data were processed in spreadsheets and graphs of cumulative frequency to analyze the productivity trends of each lithological unit based on specific capacity values distributed among the quantiles.

After verifying the productivity per lithological unit, the 1:100,000 scale mapped lineaments were cut and separated for each lithological unit as well, in order to discriminate the preferred directions within these units. This provides two-fold outcomes: a regional scale productivity differentiation among geological terranes and; a local scale, productivity discrimination across lithologies.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Univariate statistic of wells

It is worth mentioning that the median of specific capacity is the parameter that best represents the productivity in crystalline aquifers (Fernandes, 2008). For the 224 wells included in this study, this median value for specific capacity was $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Table 1). This value plays a fundamental role in this study as a cut-off marker for productivity values that will guide the geospatial analysis with lineaments, gradient magnetic oriented and lithologies. The distribution of the specific capacity of all wells presents values from the first to the third quantile from 0.12 to $0.71 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Figure 6).

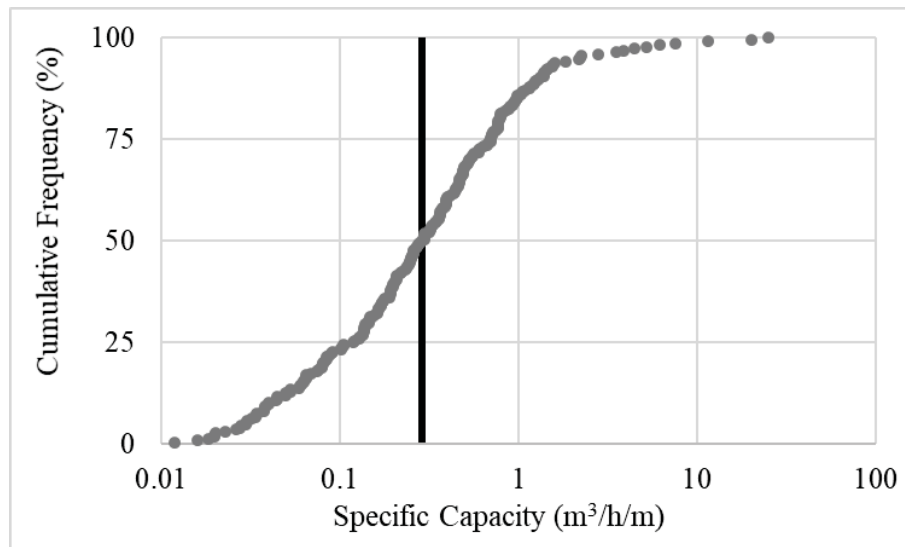


Figure 6 – Cumulated frequency of the specific capacity of the 224 wells studied at Crystalline Basement Aquifer System. The black line represents the general median of the wells: $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Table 1 presents the yields, specific capacity and total depth of the wells. The median yield is $6.30 \text{ m}^3/\text{h}$, which, according to the criteria used in the recent Hydrogeological Maps of Paraná (Brasil, 2015; Souza Filho and Franzini, 2015) and to Brazil (Diniz et al., 2014), is classified as "generally very low, but locally low: continuous supplies are hardly guaranteed".

When compared with values calculated in other aquifers in crystalline rocks from neighboring regions and states, both the yield and the specific capacity have comparable values in the same order of magnitude. (Table 2).

Table 1 - Univariate statistics of yield (Q) values, specific capacity (Q/s), and depth of wells in the general database in the CBAS. SD = standard deviation.

224 Wells	Q (m ³ /h)	Q/s (m ³ /h/m)	Depth (m)
Average	10.11	0.81	104.64
Variance	97.90	5.72	4364.16
SD	9.89	2.39	66.06
Percentiles (%)			
100	60.00	25.00	330.00
99	49.20	10.68	304.00
98	40.54	5.75	302.16
97	40.00	4.06	272.79
95	30.00	2.20	251.70
93	25.00	1.55	243.90
91	22.97	1.38	203.72
90	22.20	1.32	200.00
85	17.82	0.98	152.00
75	13.00	0.71	144.00
65	10.00	0.47	104.95
50	6.30	0.29	90.00
40	5.00	0.21	78.40
25	4.00	0.12	56.75
15	3.00	0.06	45.23
5	1.50	0.03	33.00

Table 2 - Productivity of crystalline aquifers in states or neighboring regions to the CBAS. Some works used either specific capacity or yield and average or median of values.

Authors	Brazilian States	Q (m ³ /h)	Q/s (m ³ /h/m)
Barcellos (2019)	RJ	X	0.36
Brasil (2015)	PR	6.00	0.30
THIS STUDY	PR	6.30	0.29
Fernandes et al. (2007)	SP	2 to 7	0.04 to 0.18
Madrucci (2003); Madrucci et al. (2008)	SP	X	0.15 to 0.18
Brito et al. (2020)	MG	X	0.16
Dessart et al. (2020)	RS	2.90	0.16
Fernandes and Rudolph (2001)	SP	X	0.12
Neves and Morales (2007a, 2007b)	SP	X	0.07
Barreto et al. (2000)	RJ	0 to 20	X
Chavez-Kus and Salamuni, (2008b)	PR	5 to 9.9	X

4.2 Productivity of distances and density of multi-scale lineaments (DEM)

Multi-scale lineaments extracted from shaded relief of the digital elevation model (DEM) are shown in Figure 7. At the 1:100,000 scale, 9,981 lineaments were identified, with emphasis on the NW-SE direction (Figure 7). At the 1:250,000 scale, 2,966 lineaments were observed, predominating the NW-SE, N-S and NE-SW directions (Figure 7). At the 1:400,000 scale, a total of 938 lineaments were traced, mainly in the NW-SE, N-S and NE-SW directions (Figure 7).

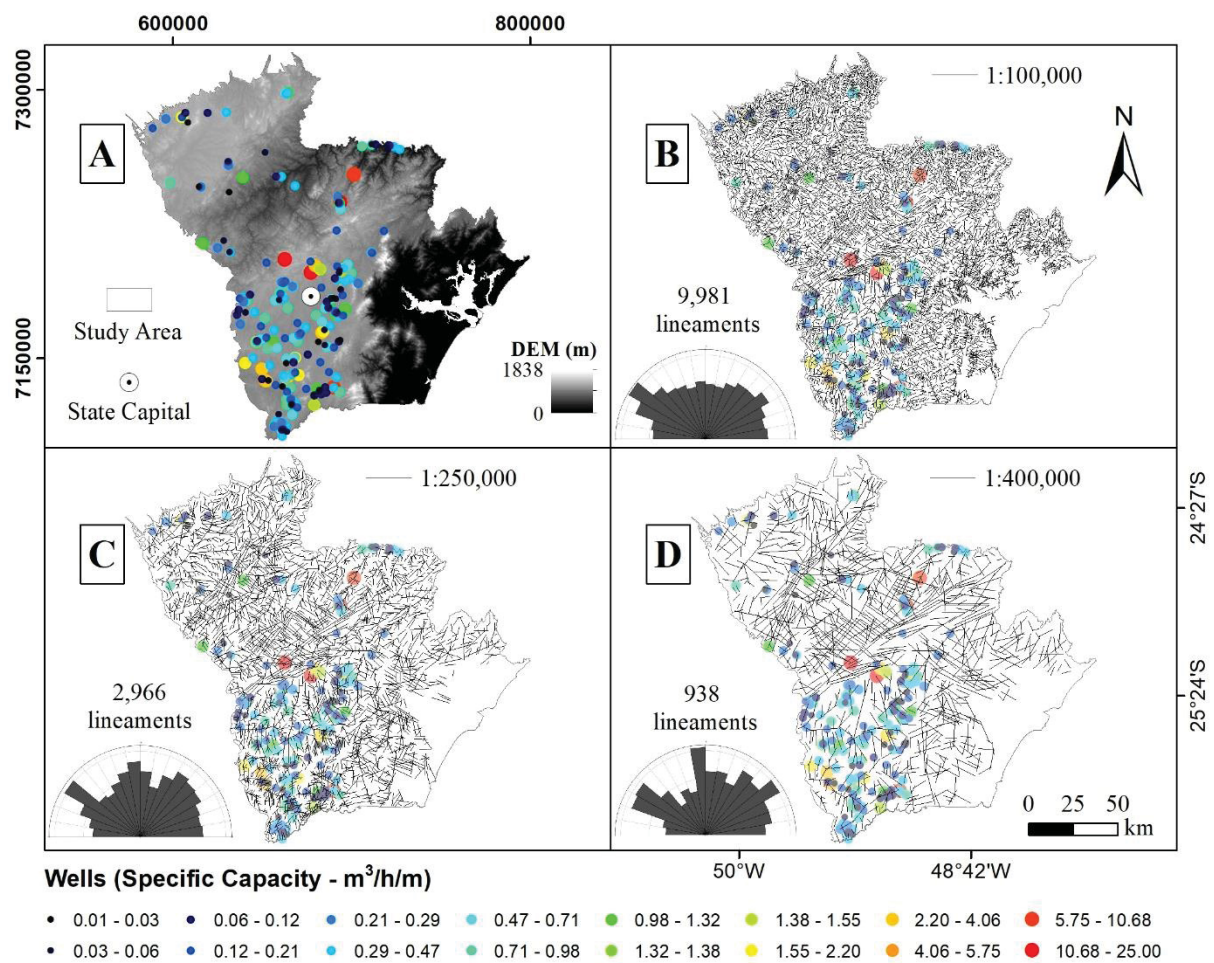


Figure 7 – A) Digital Elevation Model (DEM) base for tracing of multi-scale lineaments: B) 1:100,000; C) 1:250,000; and, D) 1:400,000. In the rose diagrams, the calculated azimuths and the number of lineaments are shown. The petals were arranged every 10° and up to 8% at the outer limit.

Through spatial correlations between the well locations and the lineaments or with intersection points of the lineaments, respectively, it is clear that the number of wells within the buffers increase proportionally to the size of the buffers at all scales (Figure 8 - A and 8 - C). On the other hand, this statement is not valid for comparing distances and productivity. According to the graph in Figure 8 - B, it is possible to notice that for the 1:100,000 and

1:250,000 scales, the specific capacities are consistently greater than in the 1:400,000 scale up to the 350 m distance from the lineament. After this distance, the choice of a scale becomes indifferent, since the curves tend to the same level of productivity. For this reason, the 1:400,000 scale was not used on the following stages of the productivity analyses, and the 350 m value became the reference distance for the productivity analyses and direction of the lineaments performed in the following.

Similarly, the lineaments extracted on the 1:100,000 scale cover the wells with the highest productivity median in relation to the intersection distances of lineaments, mainly in until 400 m buffer, with a value greater than $0.25 \text{ m}^3/\text{h/m}$, but still below the general median of the wells (Figure 8 - D). Distances greater than 600 m, gradually integrate wells with higher productivity at the three scales, reaching a peak buffer of 1,200 m and 2,000 m radius.

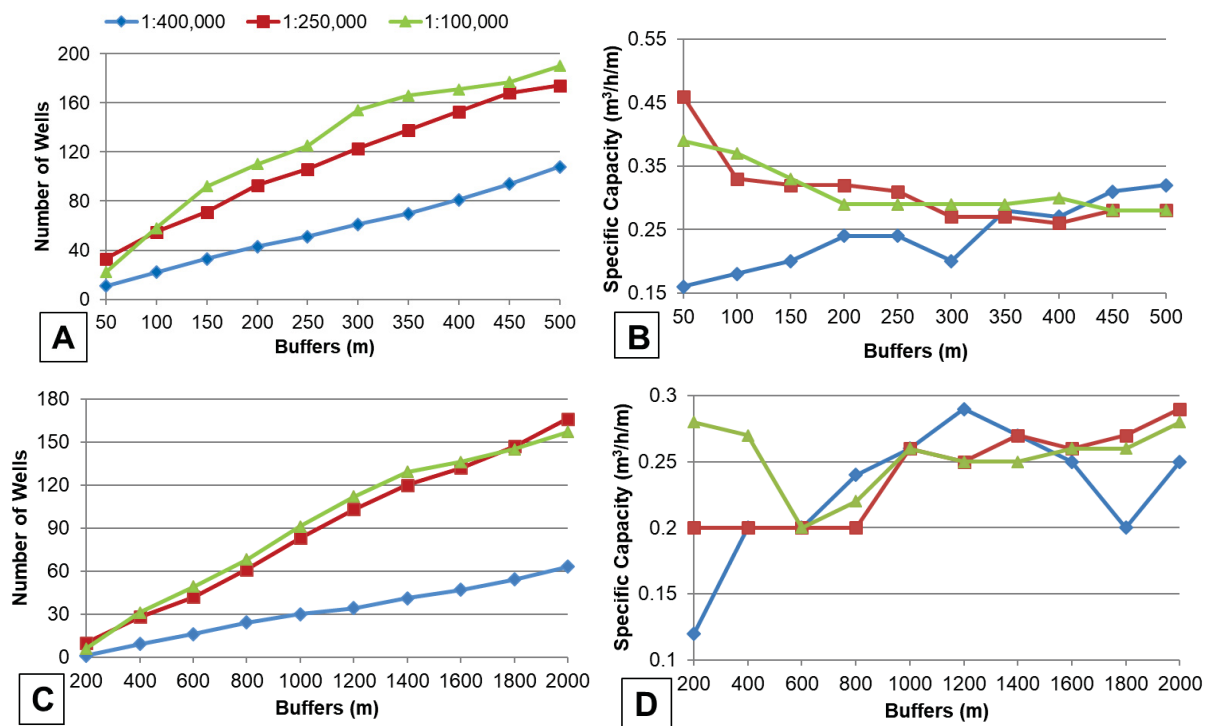


Figure 8 – Relationship between wells and lineament buffers at different scales: A) number of wells x buffer sizes; B) productivity x size of lineament buffers; C) number of wells x size of buffers from lineaments' intersection points; D) productivity x size of buffers from lineaments' intersection points.

The maps of lineaments density and their intersections (Figure 9) were generated from the lineaments map in the scale 1:100,000, because the greatest number of lineaments were extracted at this scale (Figure 7).

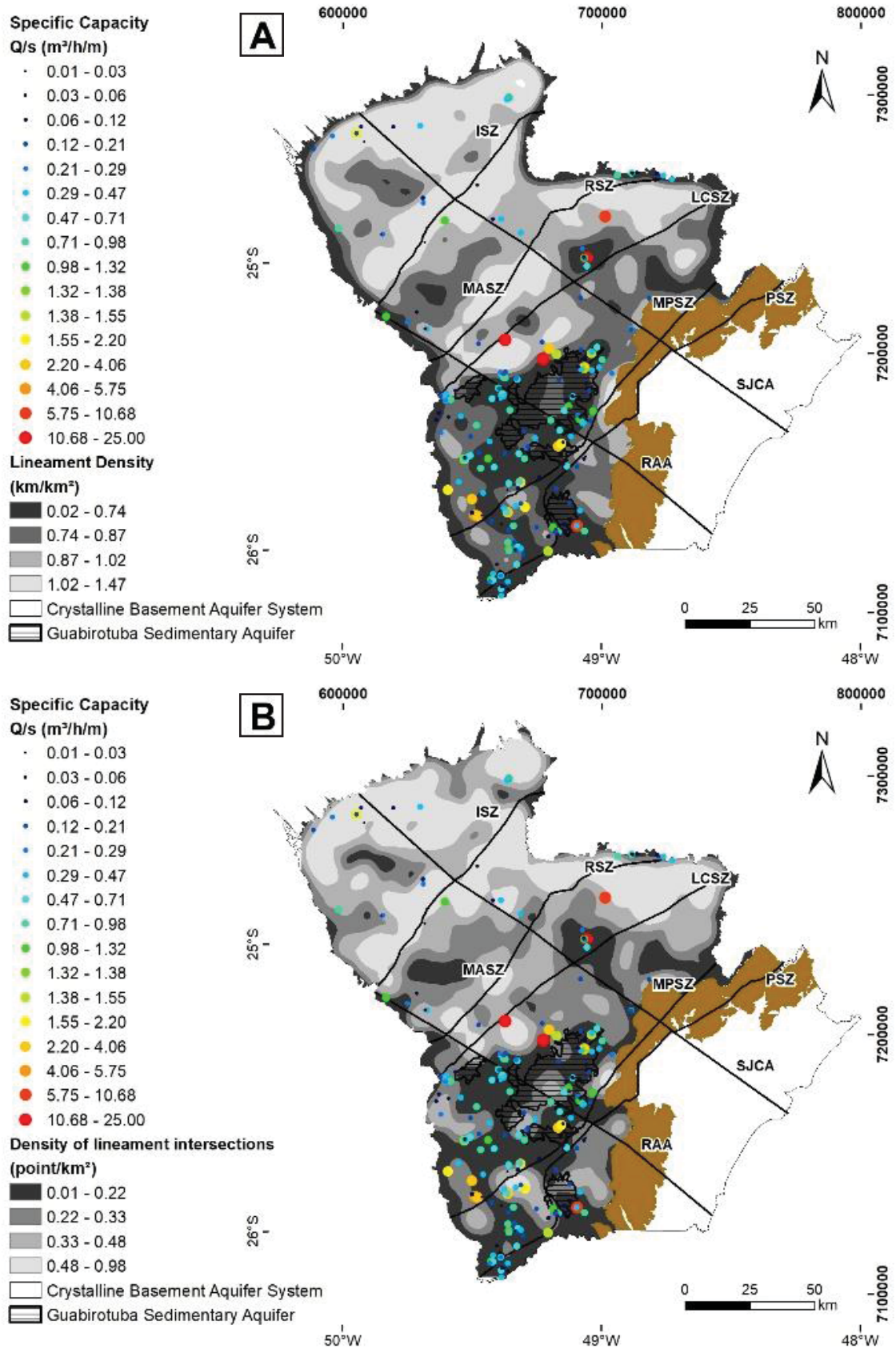


Figure 9 – Maps of kernel density of lineament scale 1:100,000. A) Density of lineaments; B) Density of lineament intersections.

In the two lineament density maps (Figure 9), the lowest concentrations (first quantile) cover the Curitiba and Luis Alves Terranes, where significant and widely spaced rivers, such as Iguaçu and its tributaries, from NE-SW and E-W directions and other subordinate N-S directions are present. Based on the maps in Figure 7, the same pattern can be seen in other scales of more regional tracing, where the shear zones Mandirituba-Piraquara (MPSZ) and Piên (PSZ) are also present, associated with isolated intermediate values of density in the Curitiba Terrane.

On the other hand, the regional lineaments are more representative in the Apiaí Terrane, such as the Lancinha-Cubatão (LCSZ), Itapirapuã (ISZ), Morro Agudo (MASZ) and Ribeira (RSZ) shear zones with NE-SW direction and the magnetic alignments Rio Alonzo (RAA) and São Jerônimo-Curiúva (SJCA) with NW-SE direction. A more dense patch of lineaments and intersections involves these regional orientations suggesting that the damage zones of these structures play a more significant role in the fragmented structure of the relief of these areas.

Table 3 presents the median of specific capacity associated with density classes show in the maps on Figure 9. It is noticeable that high density regions do not necessarily contain the most productive wells in CBAS. On average, the best wells are found in regions with low density of lineaments.

Table 3 - Productivity values of the different classes of density ranges. The number of wells for each class was separated and the median was calculated.

Percentiles	Density of lineaments			Density of lineament intersections		
	Values (km/km ²)	Wells	Q/s (m ³ /h/m)	Values (points/km ²)	Wells	Q/s (m ³ /h/m)
min - 25%	0.02 - 0.74	114	0.35	0.01 - 0.22	2	0.32
25% - 50%	0.74 - 0.87	67	0.30	0.22 - 0.33	54	0.35
50% - 75%	0.87 - 1.02	27	0.20	0.33 - 0.48	23	0.15
75% - max	1.02 - 1.47	16	0.29	0.48 - 0.98	145	0.34

Fernandes et al. (2007) found a direct relationship between productivity and density both with the lineaments and lineament intersections in the crystalline basement in São Paulo, while Madrucci et al. (2008) did not find this relationship, but it draws attention to the location of some very productive wells in high-density regions.

On a more detailed scale at the Atuba Complex, Chavez-Kus and Salamuni (2008b) indicated, through geostatistical methods, precisely the areas close to the intersections of the lineaments as the most attractive in terms of location and drilling.

Other authors (e.g. Srivastava and Bhattacharya, 2006; Ndatuwong and Yadav, 2014) proposed areas of higher lineament density as favourable for achieving productive wells, although based on limited field data analysis or empirical models for weighting thematic layers.

In this research, it is evident, therefore, that the areas of intersection are not a discriminatory parameter, through the approach performed and considering the extent of the study area. Nevertheless, outliers of highly productive wells were attested in areas of high density (e.g. red wells in the Figure 9), however, without significant statistical meaning.

4.3 Oriented Magnetic Gradients (OMGs)

The magnetic sources were separated by different depths defined by the radially measured power spectrum filter (RAPS¹) applied to the Total Magnetic Anomaly Field TMA¹ and defined as: Deep, Intermediate, Shallow and Noise” (Figure 10; Figure 11). The noises were separated in “Partial” and “Total” (Figure 11). These intervals were visually determined according to the most accentuated slope’s break points on the main curve of the spectrum (Geosoft, 2009). The values of the number of waves (cycles/km) entered in Equation 3 resulted in the values of wavelength (m, Table 4), which were inserted in the low-pass, band-pass and high-pass filters to generate the corresponding grids at specific depths (Figure 10). The depths were verified in an electronic spreadsheet and values equal to zero meter were removed, as they are spurious anomalies.

Table 4 - Parameters from different magnetic sources after application of the RAPS technique. The values of the wavenumber were inputs in Equation 3, resulting in the wavelength. The wavelength served as cut-off parameters to low-pass, high-band and high-pass filters to generate the maps of the different magnetic depth sources.

	Magnetic sources		
	Deep	Intermediate	Shallow
Wavenumber (cycles/km)	0.00 to 0.05	0.05 to 0.42	0.42 to 2.23
Wavelength (m)	> 20,000	20,000 to 2,380	2,380 to 448
Median of estimated depth (km)	7.61	0.80	0.32

The deep sources (Figure 11) show depths down to 21 km, with a median depth of 7.61 km. For intermediate sources (Figure 11) the largest depths are about 9.32 km, with a median depth of 800 m. For shallow sources (Figure 11), observed depths are above 2.94 km, with a median depth of 320 m.

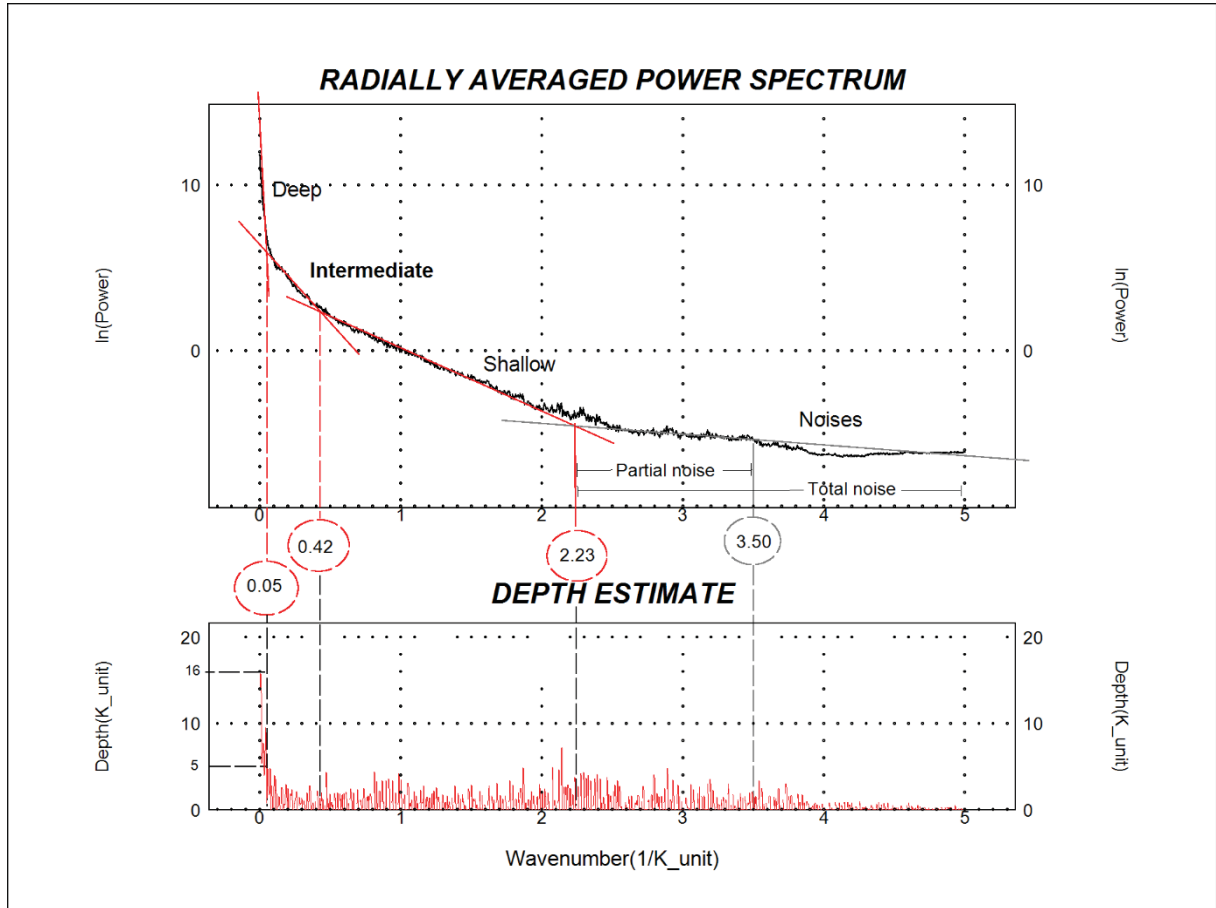


Figure 10 – Radially measured power spectrum (RAPS) - A) RAPS¹, the sources were broken down into deep, intermediate, shallow and noise (partial and total) from the first total magnetic anomalous field - TMA¹.

The sources classified as partial noise have depths down to 1.44 km, and median at 90 m. The total noise data extend down to 1.64 km from surface, with a median depth of 30 m. The shallow and noise sources were not considered for features analysis due to the low quality of their signals, making it impossible to extract the gradients accurately. Deep sources' magnetic signals exceed by far the depth of the study wells (~ 90 m, Table 1), and are thus assumed not to contribute to the groundwater flow regime encountered by the wells.

Finally, the intermediate sources were chosen as the base-grid for the layout of the oriented magnetic gradients - OMGs (Figure 12), as it has the best quality among the generated grids and are likely to be associated with possible structures within the depth range of the study wells.

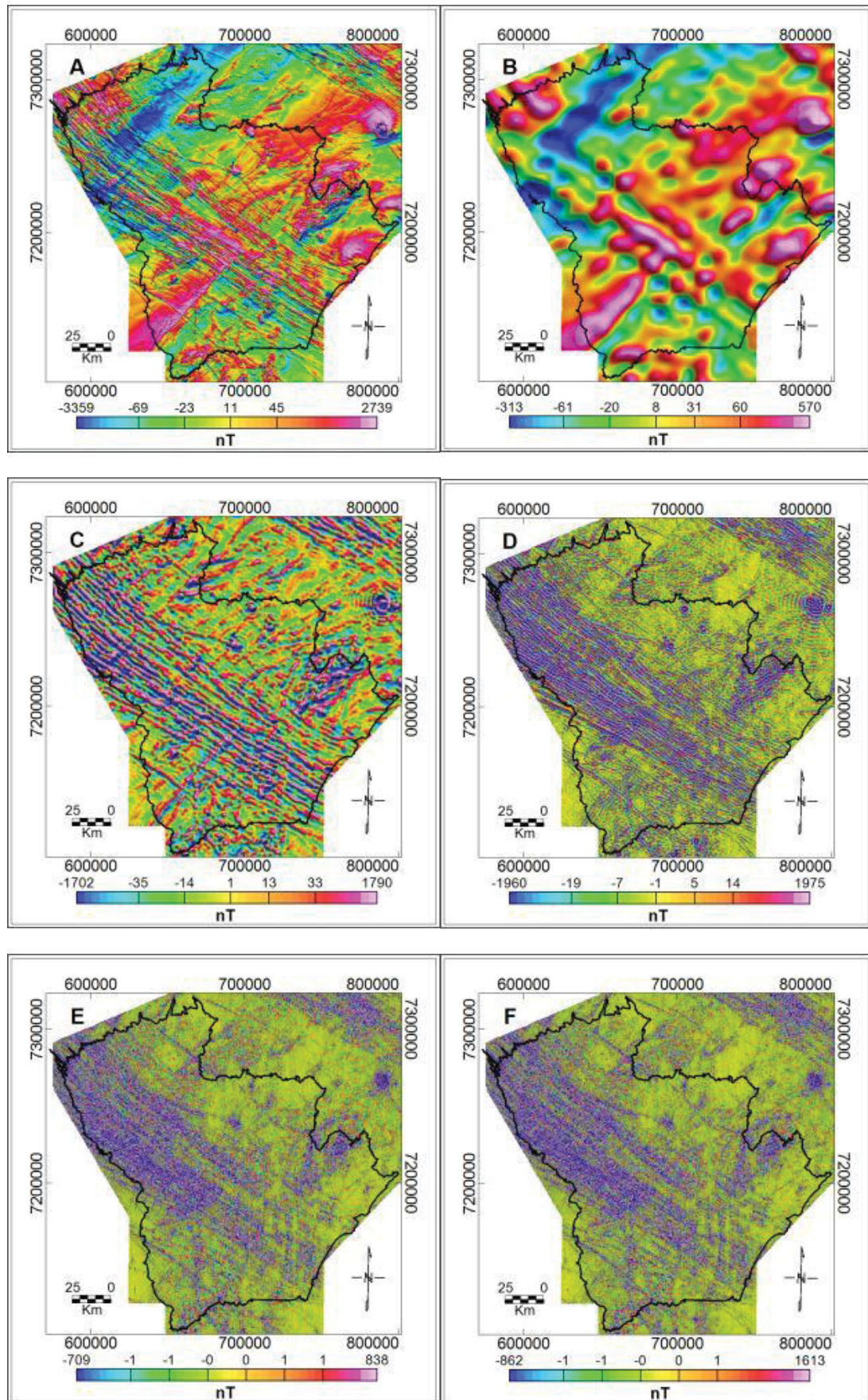


Figure 11 - Map of magnetic sources broken down according to depth: A) Total magnetic anomalous (TMA¹); B) Deep sources; C) Intermediate sources; D) Shallow sources; E) Partial noise; F) Total noise.

The Direct-Cosine-DC filter was applied to TMA¹ with an entry angle value of 315°, resulting in a second Total Magnetic Anomaly Field - TMA². Again, the radially measured power spectrum filter - RAPS² (Appendix 4) was applied to TMA² to define most representative depths of magnetic sources in the grid filtered by the cosine. Among the source depths, the intermediate sources map (depths down to 10.62 km, and median at 740 m) was chosen and reduced to the magnetic north pole-RTP² and after, calculated the tilt derivative-TDR². The oriented magnetic features-OMGs were interpreted based on TDR² (Figure 12) at the 1:250,000 scale.

According to Figure 12, it is noticeable that the tilt derivative of the magnetic map reduced to the pole enabled the trace of 968 OMGs which are markedly NW-SE oriented. The same data but filtered to 315° (direct cosine filter) provided 1,526 OMGs (Figure 12) markedly NE-SW orientation. Both OMGs were integrated, the duplicated tracks were removed, which resulted in 1,988 OMGs in Figure 12.

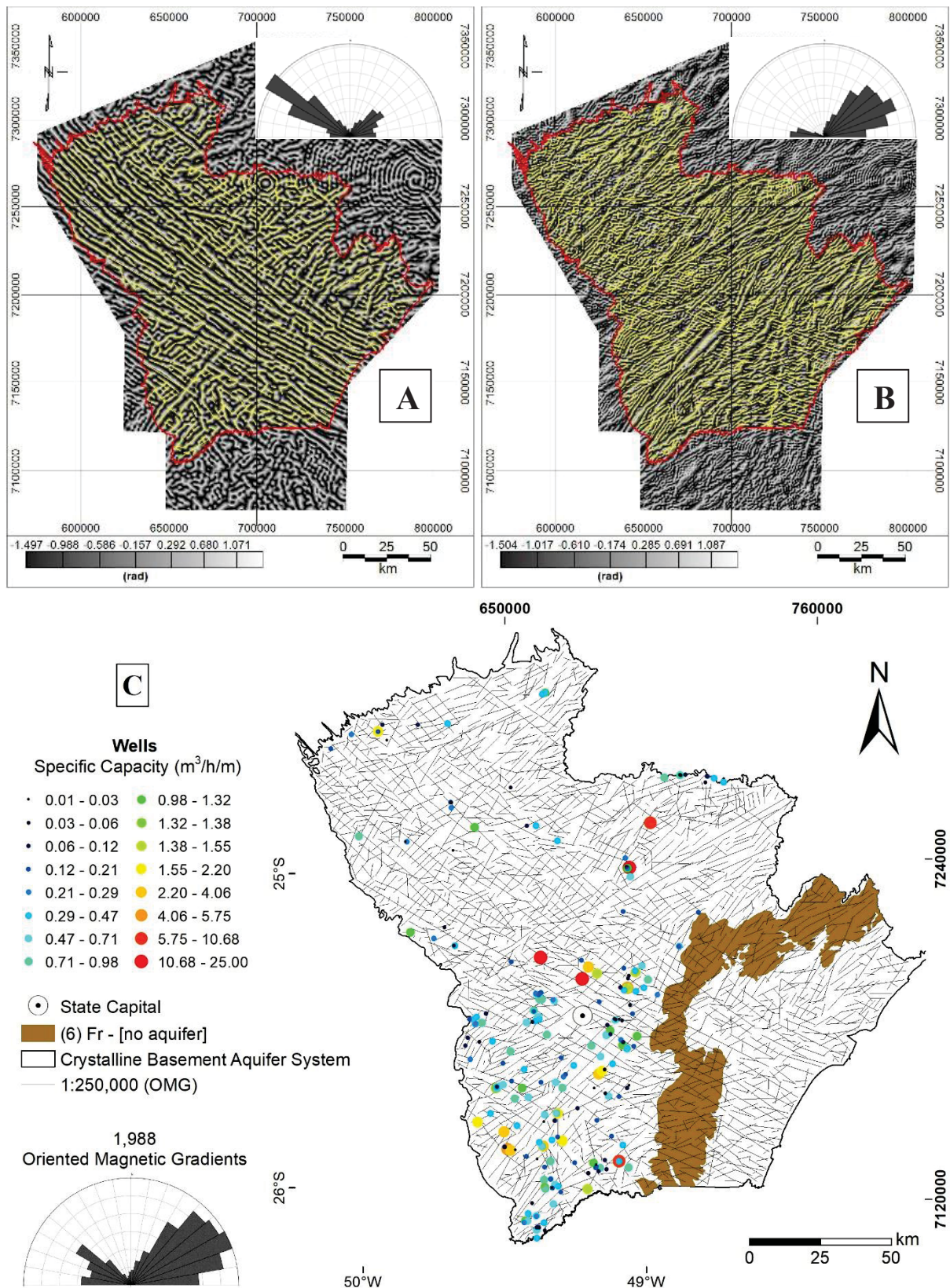


Figure 12 - Tracing of oriented magnetic gradients (OMGs) on the map of intermediate sources and their respective rose diagrams (10° between the bars - 18% maximum frequency). A) Tracing with the NW-SE structures highlighted; B) Layout with the highlighted NE-SW structures; C) Integration of OMGs.

4.4 Hydrolithological units

The CBAS was separated into hydrolithological units based on concepts in Diniz et al. (2014) by simplifying the lithologies and faciology according to similarities in type of aquifer and permeability, therefore productivity as aquifers (Figure 13). The simplification was carried out exclusively on the MINEROPAR (2006) geological map, also used in Figure 2 for the preparation of terranes, while the productivity statistics per lithological unit prioritized lithological characteristics available in 182 wells log (Table 5).

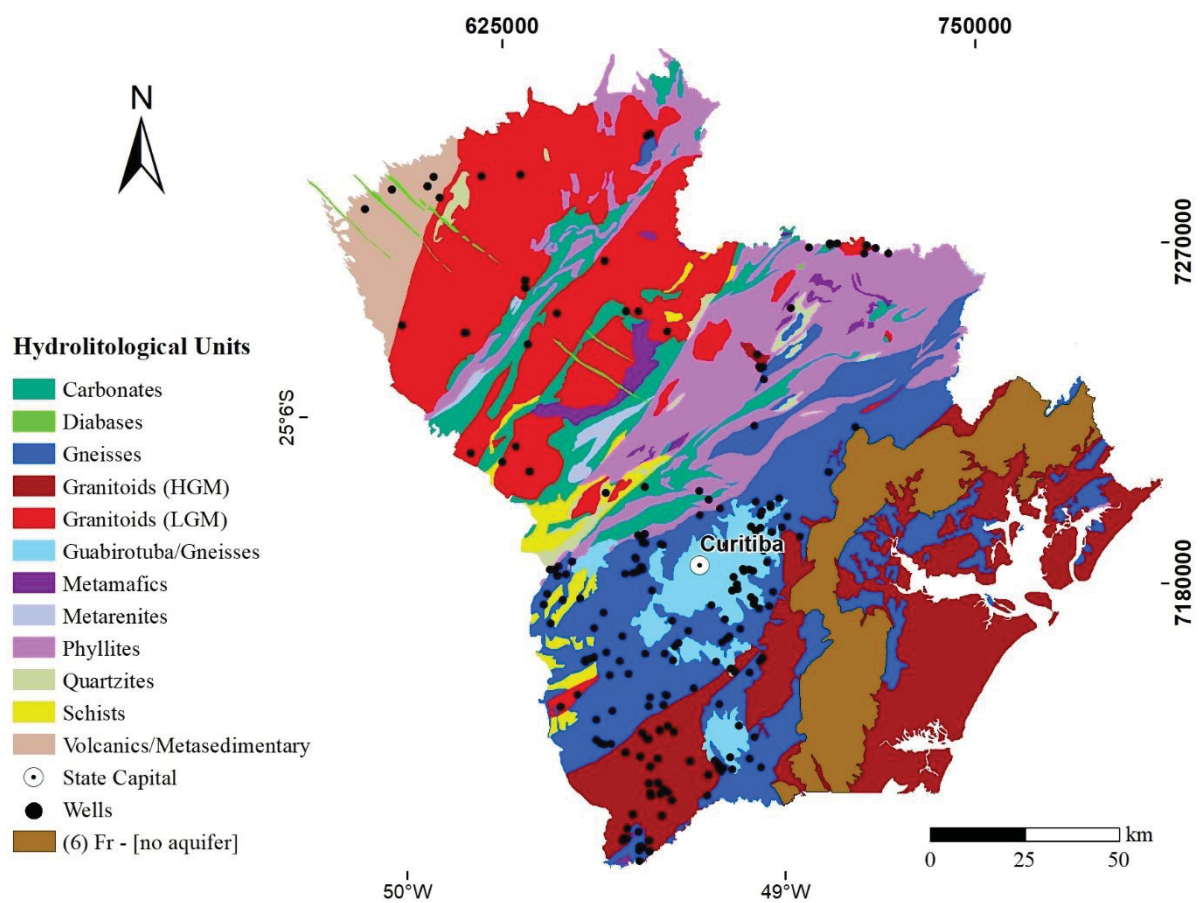


Figure 13 – Simplified map of the lithological units used in the correlation of water productivity in the CBAS region.

Table 5 - Wells productivity per lithology and productivity of hydrolithological units. Q/s = Specific capacity; WE = Water entrance (meters below ground).

Hydrolithological Units	Q/s - median (m ³ /h/m)	Number of wells	WE depth - median (m)	Number of wells with WE	Number of WE	Median of number of WE	Wells with lithological description
Quartzites	0.47	2	32.0	1	2	2	2
Gneisses	0.37	82	36.0	39	110	3	68
Granitoids (HGM)	0.31	64	34.0	44	113	2	62
Granitoids (LGM)	0.25	25	42.0	15	36	2	20
Schists	0.23	10	34.5	4	8	2	10
Guabirrotuba/Gneisses	0.19	25	41.5	17	44	2	22
Phyllites	0.19	10	34.0	11	5	2	7
Volcanics/metasedimentary	0.16	6	42.0	2	5	2	1
Total / General Median (WE)	//	224	36.0	133	323	//	192

The productivity of the units is represented in the graph of cumulative frequencies in Figure 14. Although quartzite has the highest productivity (0.47 m³/h/m), it has no statistical representativeness, as it contains two wells only. The two wells in this unit are located in the municipality of Adrianópolis.

That said, the gneisses were considered to have the greatest hydrogeological potential, hosting 82 wells (Table 5). Its median productivity is 0.37 m³/h/m, a value above the median of the general database. The unit has 39 wells that sum 110 water entrance (WE) information. Its median number of water entrance per well equals 3, unlike the other units in which median drops to 2 WE per well.

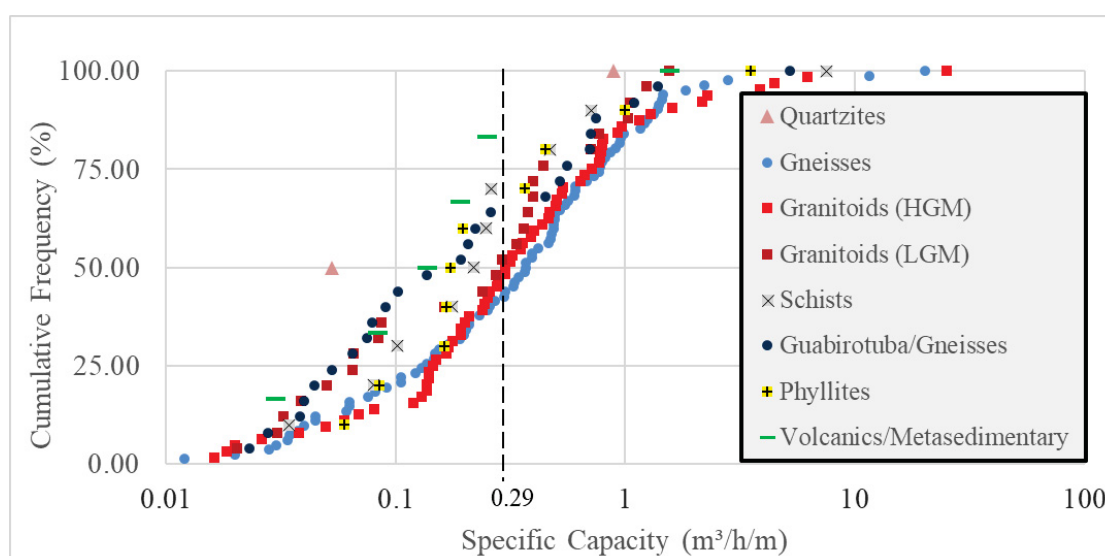


Figure 14 – Cumulative frequency graph of wells productivity by hydrolithological units. The units are: quartzites, gneisses, granitoids (HGM), granitoids (LGM), schists, guabirrotuba/gneisses (sedimentary aquifer over gneisses), phyllites, and volcanics/metasedimentary. The dashed line represents the median productivity of the general database: 0.29 m³/h/m.

Although the hydrolithologic unit guabirota/gneisses is in the same region of gneisses, it is not very productive (median of $0.19 \text{ m}^3/\text{h/m}$). The unit consist of 80 m-thick Guabirota sediments that cap the Atuba Complex gneisses, therefore we define them as an aquifer system where recharge to the gneiss is not directly from surface but through clayey-sand sediments and immature conglomerates (Lima et al., 2013). Such sediments usually have variable permeability that prevents continuous recharge, which may explain the lower water exploitation favorability.

Granitoids were differentiated according to their tectonic settings. Thus, Granitoides HGM hydrolithologic unit are those intruded in high-grade metamorphic domains, located in the Curitiba, Luis Alves and Paranaguá Terranes and contain 64 drilled wells with a median specific capacity of $0.31 \text{ m}^3/\text{h/m}$. The Granitoids LGM are those types intruded in low-grade metamorphic domains. They are located in the Apiaí Terrane and they have 25 drilled wells with a median specific capacity of $0.25 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

The schists, phyllites and volcanics/metasedimentary units have the lowest productivity together with the Guabirota/gneisses (Table 5) and below the general well median. The metapelitic and volcanic units located in the Castro Basin (northwest region of CBAS) follow the same hypothesis as the Guabirota/gneisses unit, since the metapelitic rocks may be hindering infiltration through the fractures until the underlying rhyolite and andesite flows.

4.5 Productivity of lineament directions at regional scale and with hydrolithological units

Evaluations of azimuth and productivity were performed for lineaments on a regional scale, 1:100,000 and 1:250,000 and at 1:250,000 scale for OMGs (Figure 15), with a 350 m buffer, with is the reference distance defined in this work (Figure 8).

The method made it possible to individualize different lineaments that intercept one or more wells. This assumption is important due to the possibility that the same structure is influencing the productivity of different wells.

The 350 m buffer of lineaments at 1:100,000 scale encompass 162 wells (Figure 15). Specific capacities greater than or equal to $0.50 \text{ m}^3/\text{h/m}$ are associated with the N40W, N10E and N70E directions. Subsequently, in the directions N70W, N20-30W, N20-30E, N50E and N80E the values vary from 0.30 to $0.50 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

We compared the productivity of the wells to the lineaments (Figure 15) and to OMGs (Figure 15), both extracted from the 1:250,000 scale. The most productive directions were NW-

SE and ENE-WSW with values above $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Other productive directions are different for the two data sets, indicating that each method may highlight different physical properties of the structures (an erosive feature of lineaments X magnetization intensity by airborne geophysics). The coincident directions of lineaments and OMG indicate surface structures that extend to kilometers in to the upper crust. Structural lineaments not coincident to OMGs indicate not magnetized structures.

Structural lineaments N-S or NNW-SSE directions not coincident to OMGs indicate no magnetized structures. These directions can be related to Late Jurassic to Cenozoic tectonic that generated the South Atlantic opening and the evolution of the Southeast Brazil margin (Salamuni, 1998; Fernandes and Rudolph, 2001; Fernandes and Amaral, 2002; Chavez-Kus and Salamuni, 2008b; Rivas et al., 2019). Thermal regimes were not sufficient to reorient or demagnetize mineral fabric along that structures.

Further, we compared the wells productivity in each hydrolithological units with 1:100,000 scale lineaments, as we considered more representative for this type of analysis. The results showed that there is a clear difference in the hydrogeological dynamics of tectonic terrains (regional scale), and lithologies (detail scale).

The more and the less productive directions of each units are displayed using the red and blue arrows, respectively (Figure 16). In the same way, the petals of the rose diagrams have the same colors for values above and below the general median $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Table 6 provides for each unit the median productivity of all wells encompassed by a proximity distance of 350 m to a class of lineament azimuth.

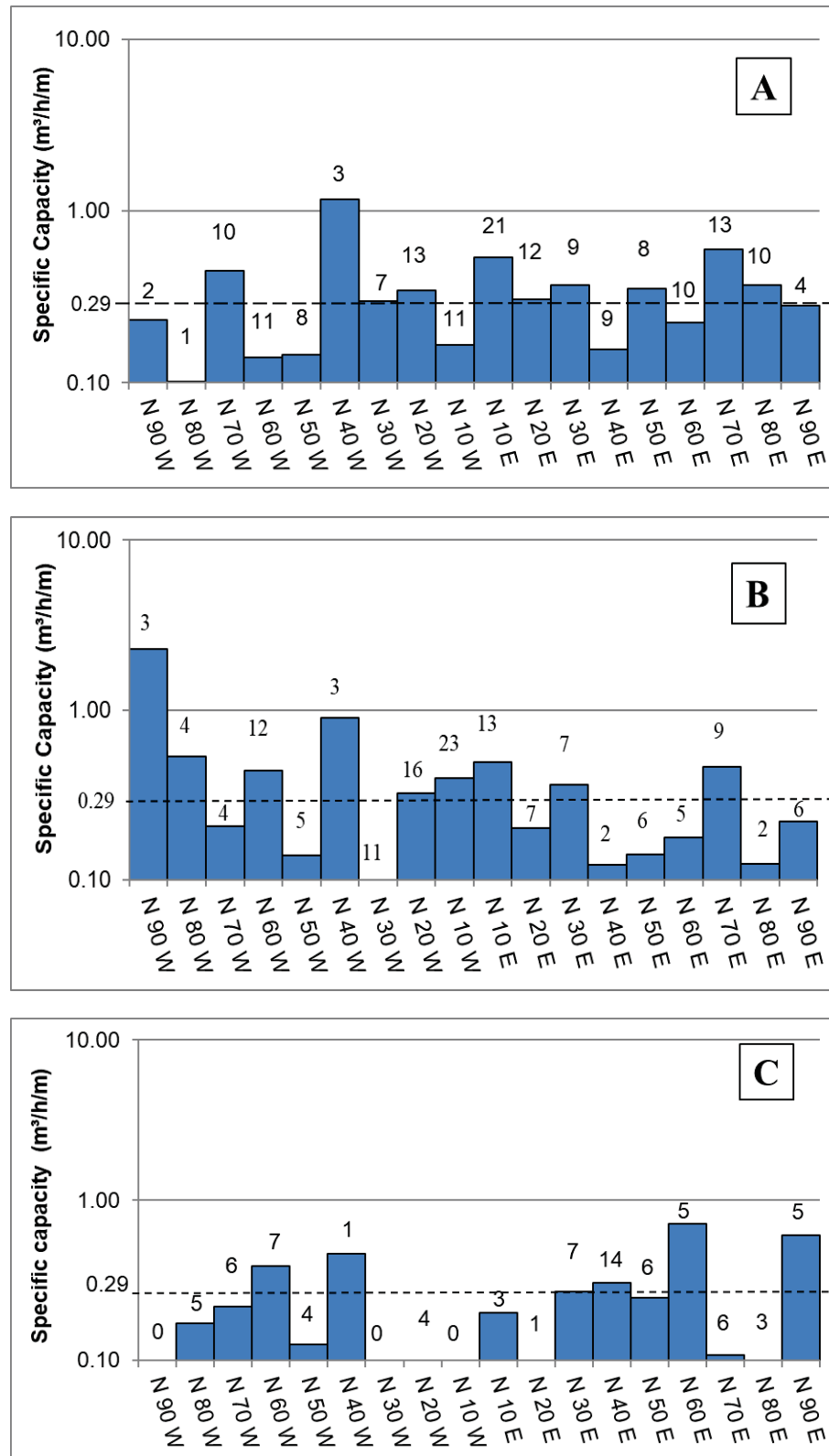


Figure 15 – Relationship between well productivity, number of wells (top of columns) and azimuth classes encompassed within a 350 m-buffer from lineament extracted at different scales: A) Lineaments at 1:100,000 - 162; B) Lineaments at 1:250,000 - 135 wells; and, C) Oriented Magnetic Gradients at 1:250,000 - 77 wells.

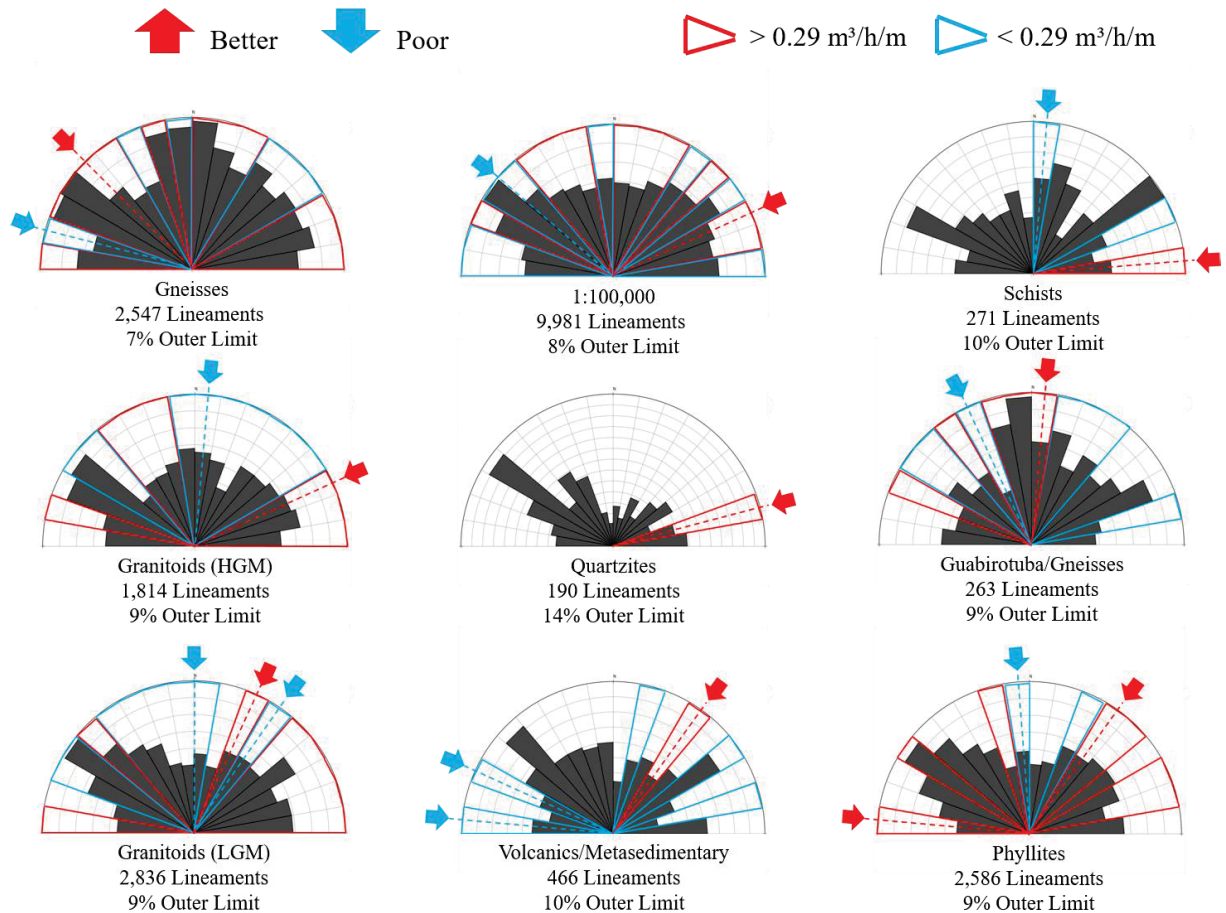


Figure 16 - Rose diagram of the 1:100,000 scale lineaments clipped to each hydrogeological units separately. The red colored arrows and petals indicate the best directions and the blue arrows, the poorest directions associated with productivity.

The productive structures identified in the 1:100,000 scale coincide with the direction of several Precambrian, Mesozoic and Cenozoic structures.

The only two wells completed in the quartzite are close to a lineament that governs a N80E drainage, corresponding to the Ribeira River. However, the most frequent direction of the lineaments identified in this unit was N60W.

Gneissic rocks have more productive directions in N50-60W and N20E with specific capacity up to an order of magnitude higher than less favorable directions. In this lithology, the structural directions that aggregate wells with yields above 0.29 m³/h/m are the trends: NW-SE referring to dykes of Ponta Grossa Arch-PGA; ENE-SW regarding the regional foliation trend; N-S and E-W referring to Cenozoic reactivations (Salamuni, 1998; Fernandes and Amaral, 2002; Chavez-Kus and Salamuni, 2008b; Rivas et al., 2019). In addition, important rivers in the region are oriented in these directions, such as the Iguaçu River (NE-SE and E-W directions, and its tributaries in the N-S direction).

Table 6 - Relationship between number of wells, median of productivity (m³/h/m) and lineaments azimuth discriminated by hydrolithological units within CBAS. Qz = quartzites; Gn = gneisses; Gr = granitoids; Sch = schists; Gua/Gn = Guabirotuba/gneisses; Phy = phyllites; Vol/Met = Volcanics/metasedimentary.

	1:100,000		Qz		Gn		Gr (HGM)		Gr (LGM)		Sch		Gua/Gn		Phy		Vol/Met	
	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s	W	Q/s
N90W	2	0.23			2	0.50	0		4	0.30			0		1	7.55	1	0.03
N80W	1	0.10			1	0.10	1	0.46	0				0		0		0	
N70W	10	0.45			5	0.34	0		4	0.24			4	0.45	0		1	0.03
N60W	11	0.14			3	1.40	4	0.17	2	0.05			2	0.12	4	2.26	0	
N50W	8	0.14			2	1.44	2	0.08	6	0.31			2	0.05	0		0	
N40W	3	1.16			4	0.68	3	0.52	3	0.24			1	0.52	0		0	
N30W	7	0.30			3	0.15	4	0.47	1	0.24			1	0.03	0		0	
N20W	13	0.34			8	0.35	4	0.47	2	0.11			1	1.29	1	0.61	0	
N10W	11	0.17			7	0.17	1	0.14	2	0.03			4	0.40	2	0.19	0	
N10E	21	0.53			22	0.49	1	0.04	1	0.03	1	0.16	4	1.38	0		0	
N20E	12	0.30			8	1.34	7	0.14	0				3	0.19	0		1	0.08
N30E	9	0.37			4	0.37	4	0.05	2	0.80			2	0.14	2	0.27	0	
N40E	9	0.16			6	0.24	1	0.17	1	0.03			1	0.08	1	7.55	2	0.84
N50E	8	0.35			2	0.15	6	0.18	1	0.44			0		2	0.58	0	
N60E	10	0.22			11	0.21	3	0.17	4	0.30			0		0		1	0.25
N70E	13	0.60			6	0.40	2	1.05	4	0.53	1	0.16	0		4	0.63	0	
N80E	10	0.37	2	0.47	3	0.37	1	0.71	2	0.39			2	0.15	3	3.53	1	0.08
N90E	4	0.28			5	0.35	1	0.32	5	0.40	1	0.35	0		0		0	
Total/ Medians	162	0.30	2	0.47	102	0.36	45	0.18	44	0.27	3	0.16	27	0.17	20	0.63	7	0.08

Similarly, granitoides (HGM) have the most productive direction throughout the regional structuration N70-90E and N20-40W. The NW-SE structures parallel to PGA and ENE-WSW parallel to Cenozoic and posterior reactivations seem to have a positive influence on this unit. The low productivity is related to the wide directional range between N10W and N60E, coinciding with the main structural trend of the Atuba Complex's gneisses.

Granitoids (LGM) seem not to be influenced in productivity by PGA dykes, even located in a region with a high density of lineaments and intersections of this trend (Figure 9). The most productive directions are parallel to the E-W and NE-SW structures, coinciding with the Cenozoic structures and with the direction of the main rivers of this basin, such as Ribeirinha, Palmital and Ribeira.

The schists unit has low statistical representativeness, with only 2 wells. The N10E and N70E directions are associated with least productivity well and intercepted by the Conceição River with direction NW-SE. The most productive is intercepted a E-W lineament, close to the Rio Verde towards ENE-WSW, a tributary of the Iguaçu River.

The Guabirotuba/gneisses unit has a preferential N-S direction, parallel to the main rivers in the region, and less significantly influenced by NW-SE directions.

The phyllites show associations of good productivity with several directions ranging from E-W to N40E, N60W and N20W. This unit is also in a region with a high density of lineaments and lineament intersections and close to the damage zone of the Lancinha-Cubatão Shear Zone of NE-SW direction. This context suggests that phyllites when close to regional and vertical structures tend to have increased productivity, which depends on the intensity brittle deformation generating open, extended and interconnected discontinuities.

The small number of wells drilled in the volcanics/metasedimentary unit limits a confident interpretation. Best productivity is associated with N40E direction which is observed at two wells separated less than 10 m apart and close to the Pirai River. Other directions reveal low productivity. This may be related the clay and arkoses layers inhibiting recharge of the underlying andesites and riolites volcanics. However, individual productive wells are observed where the acid volcanics outcrop near Carambeí city

There is no clear relationship between the frequency of lineaments and wells productivity per hydrolithological units in the study area. The lack of correlation may indicate the existence of a secondary source of water recharge to the wells along the interface between soil/regolith and horizontal/sub-horizontally fractured rock, since the water entrance are relatively shallow, median of 36 m from the surface, according to Brasil (2015). However to further assess this aspect, an approach at the scale of the well bore would be required, which is beyond the scope of this study.

5. CONCLUSIONS

This work focused on the geospatial analysis of well productivity, at regional and local scales, across different geological conditions present in the Crystalline Basement Aquifer System (CBAS) at the State of Paraná, Brazil. The study highlighted new exploratory targets quantitative and qualitative analysis. Furthermore, the methods applied may be transferred to other crystalline terrains in general.

Nonetheless, varying potentials of well productivities may be observed depending on the scale of the interpreted lineaments. Based on a buffer distance of 350 m from a lineament, considerable greater specific capacities is most likely to occur in proximity to lineaments extracted at 1:100,000 and 1:250,000 scales, than to the lineaments observed at 1:400,000 scale. The most productive directions coincide with regional trends, such as the Ponta Grossa Arch (NW-SE), shear zones (NE-SW) and Cenozoic tectonic reactivations (N-S and E-W),

sometimes associated with important rivers and particular structures (foliations etc.) of some lithologies.

The classes of the density map, at 1:100,000 scale, showed weak association with high productivity, and, conversely, high values of density have been associated with low productivity, which denotes that the relationship between density of lineaments and productivity is either reserved or inconclusive, considering previous works in specific regions within CBAS.

The points of intersection of the lineaments was also not a discriminatory variable in the geospatial analysis, because the productivity values found were all below the median of the specific capacity of the general wells' database. However, the relatively positive contribution of this parameter occurs at the 1:100,000 scale, which encompasses high productivity wells within a proximity area up to 400 m from the lineament. In the density analysis of this same parameter, no density class proved to be discriminant enough to stand out at 400 m distance.

The oriented magnetic gradients (OMG), generated from semiquantitative (depth estimation of magnetic sources) and qualitative (anomaly enhancement) analyses, coincided with different structures highlighted by the relief geometry of lineaments such as in NW-SE directions and ENE-WSW, reinforcing these as exploratory targets. The airborne magnetics also added new prospecting features such as N60W, N40-60E and N90E of the OMGs that do not necessarily associate with best structural lineaments interpreted from digital elevation models.

We assessed the productivity potential for each hydrolithological unit based on the spatial association of wells' specific capacity and the presence of lineaments and oriented magnetic gradients.

Gneisses and granitoids (HGM) have productivity values above the general median of the wells ($0.29 \text{ m}^3/\text{h/m}$) and have favorable directions, parallel to regional trends. The productivity of granitoids (LGM) is below the general median even though they occur in regions with high density of lineaments. In this lithology, the NE-SW and ENE-WSW directions are associated with wells with good productivity.

The guabirota/gneisses and volcanics/metasedimentary units show some lineament directions with good productivity, such as N-S, NW-SE and NE-SW, respectively. However, in general, these are not hydrogeologically favorable units due to their pelitic lithological constitution that may be disfavoring their recharge areas.

Quartzite is the largest positive outlier. Although with small cartographic extent and two wells that give a weak statistical representation in the CBAS, yet this is a unit to consider

for exploration. The schists and phyllites have few wells and some of them have good productivity, especially with E-W, NW-SE and NE-SW trends. However, due to the low number of wells, it is not possible to carry out more consistent interpretations for these units.

The greater productivity of granitoides (HGM) can be partly explained by the more competent rheology of these rocks and their embedding lithologies. Coarser-grained and competent rocks such as quartzites, high-grade metamorphic rocks and granitoids tend to fracture more openly when subjected to a tectonic, unlike low-grade schist rocks in which the stress is partially absorbed in small displacements (Price, 1959; Feitosa et al., 2008).

Thus, from the parameters raised in this work, it is possible to indicate that the most productive locations are close to 350 m from lineaments oriented to N40W, N10E and N70E, however, high lineament density is not a mandatory premise to any unit except phyllites. First gneisses then granitoids (HGM) are the most productive units with specific capacity above the general median of 0.29 m³/h/m under such conditions.

The implemented python code (Equation 1 and Equation 2) helped in the statistical analysis of a large number of structures (a few tens of thousands of lineament traces) and wells (a few hundred points). The methods and database assessed here is replicable to other places and perspective like mineral prospecting and geologic risks.

Further works to minimize the exploratory risk in the crystalline aquifers of Paraná must account for: lineament interpretation at detailed scales (1:50,000 and 1:25,000); analyze the geomorphological compartments; field data about recent tectonic reactivations and interference of deformation tensors among geological terranes, seeking for new wells at regions with low well density.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Hydrogeological Research Laboratory (LPH/UFPR), for its infrastructure and guidance; to the Applied Geophysics Research Laboratory (LPGA/UFPR), for technical support and granting the program license; to the Geological Survey of Brazil (CPRM), for providing the airborne geophysical data and co-orientation; and, to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), for financial assistance via the grant number 40001016028P5.

APPENDICES

Appendix 1 - Table with the RGB color codes of the percentiles used in the classification of the wells.

Percentiles (%)	Colors	R	G	B
99 - max		255	0	0
98 - 99		255	50	0
97 - 98		255	150	0
95 - 97		255	200	0
93 - 95		255	255	0
91 - 93		180	255	0
90 - 91		100	255	0
85 - 90		0	255	0
75 - 85		0	255	175
65 - 75		0	255	255
50 - 65		0	200	255
40 - 50		0	125	255
25 - 40		0	75	200
15 - 25		0	0	100
5 - 15		0	0	50
min - 5		0	0	0

Apeendix 2 - Python Code – Complete Equation 1.

```
"N 10 E" if (!Azimute! >= 0 and !Azimute! <= 10) or (!Azimute! >= 180 and !Azimute! <=
190) else "N 20 E" if (!Azimute! > 10 and !Azimute! <= 20) or (!Azimute! > 190 and !Azimute!
<= 200) else "N 30 E" if (!Azimute! > 20 and !Azimute! <= 30) or (!Azimute! > 200 and
!Azimute! <= 210) else "N 40 E" if (!Azimute! > 30 and !Azimute! <= 40) or (!Azimute! > 210
and !Azimute! <= 220) else "N 50 E" if (!Azimute! > 40 and !Azimute! <= 50) or (!Azimute!
> 220 and !Azimute! <= 230) else "N 60 E" if (!Azimute! > 50 and !Azimute! <= 60) or
(!Azimute! > 230 and !Azimute! <= 240) else "N 70 E" if (!Azimute! > 60 and !Azimute! <=
70) or (!Azimute! > 240 and !Azimute! <= 250) else "N 80 E" if (!Azimute! > 70 and !Azimute!
<= 80) or (!Azimute! > 250 and !Azimute! <= 260) else "N 90 E" if (!Azimute! > 80 and
!Azimute! <= 90) or (!Azimute! > 260 and !Azimute! <= 270) else "N 90 W" if (!Azimute! >
90 and !Azimute! <= 100) or (!Azimute! > 270 and !Azimute! <= 280) else "N 80 W" if
(!Azimute! > 100 and !Azimute! <= 110) or (!Azimute! > 280 and !Azimute! <= 290) else "N
70 W" if (!Azimute! > 110 and !Azimute! <= 120) or (!Azimute! > 290 and !Azimute! <= 300)
else "N 60 W" if (!Azimute! > 120 and !Azimute! <= 130) or (!Azimute! > 300 and !Azimute!
<= 310) else "N 50 W" if (!Azimute! > 130 and !Azimute! <= 140) or (!Azimute! > 310 and
!Azimute! <= 320) else "N 40 W" if (!Azimute! > 140 and !Azimute! <= 150) or (!Azimute! >
320 and !Azimute! <= 330) else "N 30 W" if (!Azimute! > 150 and !Azimute! <= 160) or
(!Azimute! > 330 and !Azimute! <= 340) else "N 20 W" if (!Azimute! > 160 and !Azimute! <=
170) or (!Azimute! > 340 and !Azimute! <= 350) else "N 10 W" if (!Azimute! > 170 and
!Azimute! <= 180) or (!Azimute! > 350 and !Azimute! <= 360) else "other"
```

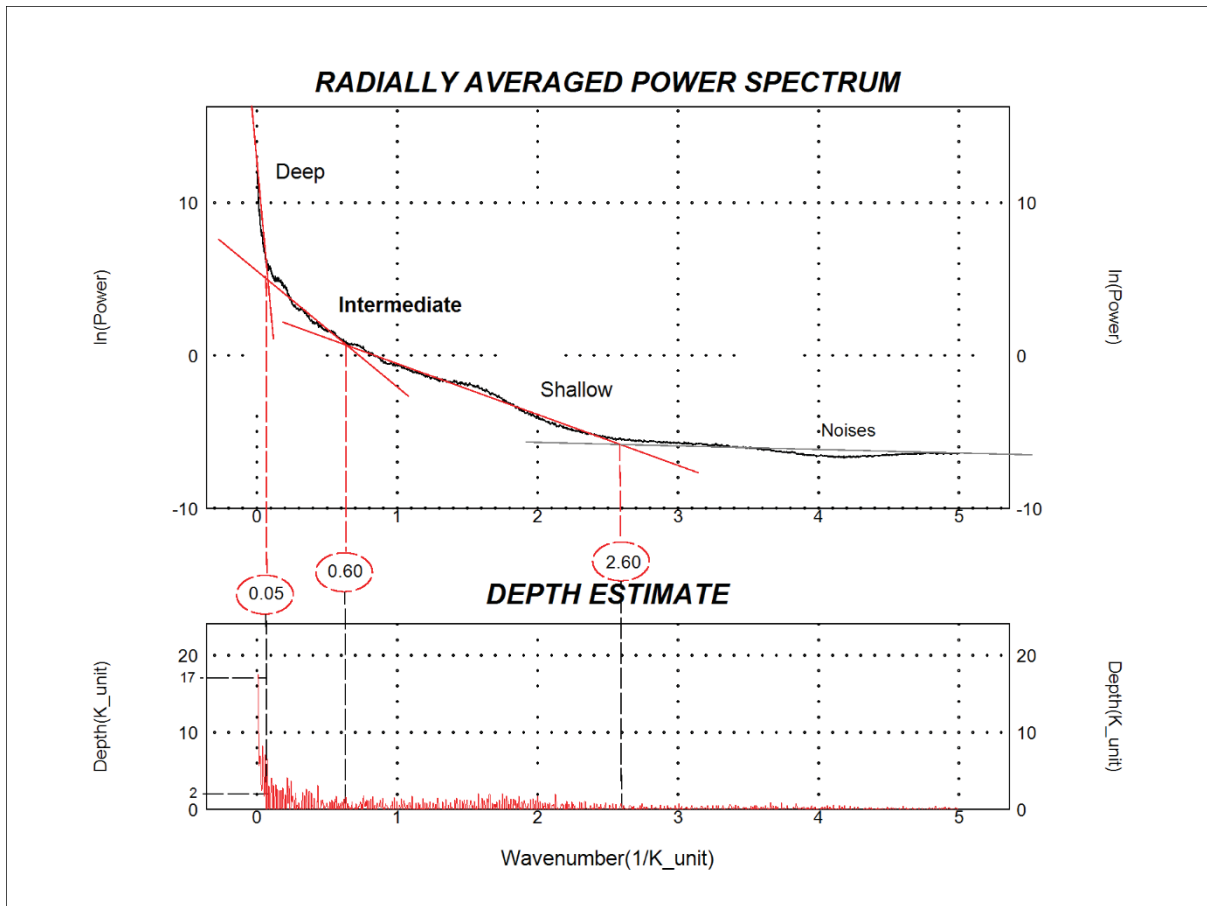

Appendix 3 - Python code – Complete Equation 2.

```

10 if (!Azimute! >= 0 and !Azimute! <= 10) or (!Azimute! >= 180 and !Azimute! <= 190) else
20 if (!Azimute! > 10 and !Azimute! <= 20) or (!Azimute! > 190 and !Azimute! <= 200) else
30 if (!Azimute! > 20 and !Azimute! <= 30) or (!Azimute! > 200 and !Azimute! <= 210) else
40 if (!Azimute! > 30 and !Azimute! <= 40) or (!Azimute! > 210 and !Azimute! <= 220) else
50 if (!Azimute! > 40 and !Azimute! <= 50) or (!Azimute! > 220 and !Azimute! <= 230) else
60 if (!Azimute! > 50 and !Azimute! <= 60) or (!Azimute! > 230 and !Azimute! <= 240) else
70 if (!Azimute! > 60 and !Azimute! <= 70) or (!Azimute! > 240 and !Azimute! <= 250) else
80 if (!Azimute! > 70 and !Azimute! <= 80) or (!Azimute! > 250 and !Azimute! <= 260) else
90 if (!Azimute! > 80 and !Azimute! <= 90) or (!Azimute! > 260 and !Azimute! <= 270) else
100 if (!Azimute! > 90 and !Azimute! <= 100) or (!Azimute! > 270 and !Azimute! <= 280) else
110 if (!Azimute! > 100 and !Azimute! <= 110) or (!Azimute! > 280 and !Azimute! <= 290)
else 120 if (!Azimute! > 110 and !Azimute! <= 120) or (!Azimute! > 290 and !Azimute! <=
300) else 130 if (!Azimute! > 120 and !Azimute! <= 130) or (!Azimute! > 300 and !Azimute!
<= 310) else 140 if (!Azimute! > 130 and !Azimute! <= 140) or (!Azimute! > 310 and !Azimute!
<= 320) else 150 if (!Azimute! > 140 and !Azimute! <= 150) or (!Azimute! > 320 and !Azimute!
<= 330) else 160 if (!Azimute! > 150 and !Azimute! <= 160) or (!Azimute! > 330 and !Azimute!
<= 340) else 170 if (!Azimute! > 160 and !Azimute! <= 170) or (!Azimute! > 340 and !Azimute!
<= 350) else 180 if (!Azimute! > 170 and !Azimute! <= 180) or (!Azimute! > 350 and !Azimute!
<= 360) else "other"

```

Appendix 4 - RAPS² - the sources were broken down into deep, intermediate and shallow from the second total magnetic anomalous with NW-SE - TMA² directional cosine filter.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante os resultados e conclusões alcançados neste trabalho, algumas considerações para contribuir em trabalhos futuros são feitas aqui.

Primeiramente, seria muito importante ampliar a quantidade do banco de dados de poços, cuja confiabilidade na proveniência de suas informações seja a maior possível, e mais espacializados ao longo dos diferentes terrenos tectônicos e unidades hidrolitológicas. Quanto mais robustas essas informações mais credibilidade terão os resultados dos condicionantes exploratórios para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino e para os aquíferos fraturados de maneira geral.

Nesse sentido, a realização dos traçados dos lineamentos em escala de maior detalhe (por exemplo, 1:50.000 ou 1:25.000), bem como dos gradientes magnéticos orientados (por exemplo, 1:100.000), poderia ser melhor aproveitado conforme o desenvolvimento de um mapeamento geológico e levantamento aerogeofísico de maior detalhe. É importante haver mais dados consolidados sobre a influência da tectônica cenozoica no embasamento cristalino (reconstituição de paleotensores, análise morfométricas do relevo e da rede hidrográfica etc.). E, principalmente, maior qualidade na descrição e no preenchimento das informações dos poços tubulares, tais como as descrições litológicas da perfuração, entradas de água e parâmetros de produtividade, nos boletins e respectivos banco de dados.

Diversas pesquisas, portanto, poderiam se beneficiar desses resultados na região do embasamento cristalino paranaense, tais como estudos de vulnerabilidade à contaminação, favorabilidade à exploração, geotecnia, mineração dentre outros.

REFERÊNCIAS

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. de, Fuck R.A., 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. VIII Simpósio de Geologia Do Nordeste.
- Alves F.M., 2008. Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia, SP. Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2008.tde-02092008-150509>
- Athayde G.B., 2013. Compartimentação hidroestrutural do sistema aquífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 155p. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/30066>.
- Barcellos J. de S.G., 2019. Relação geoespacial entre lineamentos e produtividade hídrica subterrânea em Unidades Hidrológicas de Planejamento. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Petrologia e Geotectônica, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 55p.
- Barreto A.B. da C., Monsorens A.L.M., Leal A. de S., Pimentel J., 2000. Estudo geoambiental do Estado do Rio de Janeiro - Higrogeologia do Estado do Rio de Janeiro. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Basei M.A.S., Citroni S.B., Siga Júnior O., 1998a. Stratigraphy and age of fini-proterozoic basins of Paraná and Santa Catarina states, southern Brazil. Boletim IG-USP. Série Científica 29, 195–216. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p195-216>
- Basei M.A.S., Frimmel H.E., Nutman A.P., Preciozzi F., 2008. West Gondwana amalgamation based on detrital zircon ages from Neoproterozoic Ribeira and Dom Feliciano belts of South America and comparison with coeval sequences from SW Africa. Geological Society Special Publication 294. <https://doi.org/10.1144/SP294.13>
- Basei M.A.S., McReath I., Siga Jr. O., 1998b. The Santa Catarina Granulite Complex of Southern Brazil: A Review. Gondwana Research. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70854-6](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70854-6)
- Basei M.A.S., Nutman A., Siga O., Passarelli C.R., Drukas C.O., 2009. The Evolution and Tectonic Setting of the Luis Alves Microplate of Southeastern Brazil: An Exotic Terrane during the Assembly of Western Gondwana., Developments in Precambrian Geology. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(09\)01620-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(09)01620-X)
- Basei M.A.S., Siga Jr. O., Machiavelli A., Mancini F., 1992. Evolução tectônica dos terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). Revista Brasileira de Geociências.

- <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992216221>
- Basei M.A.S., Siga Júnior O., Masquelin H., Harara O.M., Reis Neto J.M., Preciozzi F., 2000. The Dom Feliciano belt of Brazil and Uruguay and its foreland domain, the Rio de La Plata craton: framework, tectonic evolution and correlation with similar provinces of southwestern Africa. *Tectonic Evolution of South America* PP - Rio de Janeiro.
- Bezerra F.H.R., Rossetti D.F., Oliveira R.G., Medeiros W.E., Neves B.B.B., Balsamo F., Nogueira F.C.C., Dantas E.L., Andrades Filho C., Góes A.M., 2014. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics* 614. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.021>
- BGS, 2018. Campo Magnético de Referência Internacional - IGRF. British Geological Survey. <http://www.geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/IGRF.html>. Acessado em 19 de agosto de 2018.
- Blakely R.J., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, 441p.
- Bonham-Carter G., 1994. *Geographic information systems for geoscientists : modelling with GIS*. Pergamon, 398p.
- Booth W.C., Colomb G.G., Williams J.M., Bizup J., FitzGerald W.T., 2015. *The Craft of Research, Fourth Edition*, The Craft of Research, Fourth Edition. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226239873.001.0001>
- Brasil, 2015. Carta das águas subterrâneas do Paraná: resumo executivo. Ministério de Meio Ambiente - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. 337p. <http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/PUBLICACOES/LivroR5.pdf>.
- Brito T.P. de, 2018. Avaliação do potencial hídrico de aquíferos fissurais dos complexos bação e bonfim setentrional, Quadrilátero Ferrífero - MG. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. 115 p. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10801>.
- Brito T.P., Bacellar L.A.P., Barbosa M.S.C., Barella C.F., 2020. Assessment of the groundwater favorability of fractured aquifers from the southeastern Brazil crystalline basement. *Hydrological Sciences Journal* 65. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1703993>
- Briz-Kishore B.H., 1993. Assessment of Yield Characteristics of Granitic Aquifers in South India. *Groundwater* 31. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00865.x>
- Campanha G.A. da, Sadowski G.R., 1999. Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiai Domain). *Precambrian Research*. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(99\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00027-3)
- Campanha G.A. da C., 2002. O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na

- configuração da porção meridional da Faixa Ribeira. Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2009.tde-16122009-094247>
- Campos Neto M.D.C., 2000. Orogenic systems from Southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano Pan African cycle and orogenic collage in Southeastern Brazil. Tectonic Evolution of South America. <https://doi.org/10.1017/S0022149X99000591>
- Castro L.G. de, Ferreira F.J.F., 2015. Arcabouço geofísico-estrutural da porção meridional do Cinturão Ribeira. Brazilian Journal of Geology. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201520150007>
- Castro L.G. de, Ferreira F.J.F., Cury L.F., Fiori A.P., Soares P.C., Lopes A.P., Oliveira M.J., 2014. Interpretação qualitativa e semiquantitativa dos dados aeromagnéticos sobre a Zona de Cisalhamento Lancinha, porção meridional do Cinturão Ribeira no Estado do Paraná, Sul do Brasil. Geologia USP - Serie Científica. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400040001>
- Chavez-Kus L., 2008. Modelo de Funcionamento do Aquífero Atuba com Base em Parâmetros Estruturais e Hidrogeológicos, Município de Curitiba. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 239 p. <http://hdl.handle.net/1884/19088>.
- Chavez-Kus L., Salamuni E., 2008a. Determinação do parâmetro de intersecção de fraturas para o Aquífero Atuba. Revista Brasileira de Geociências. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008383455466>
- Chavez-Kus L., Salamuni E., 2008b. Evidência de tensão N-S intraplaca no neógeno, Complexo Atuba - região de Curitiba (PR). Revista Brasileira de Geociências. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008383439454>
- Chavez-Kus L., Salamuni E., 2003. Análise estatística de dados hidrogeológicos de poços tubulares profundos do município de Curitiba-Paraná. Boletim Paranaense de Geociências.
- Coriolano A.C.F., 2002. Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos, com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 274 p. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/18354>.
- Coriolano A.C.F., Sá E.F.J. De, Silva C.C.N. da, 2000. Structural and neotectonic criteria for location of water wells in semi-arid crystalline terrains: a preliminary approach in the Eastern Domain of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. Revista Brasileira de Geociências. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000302350352>
- Correia M.G., Leite E.P., de Souza Filho C.R., 2010. HIGH-organizing maps mapping the potential applied to mineral region of eastern Sierra Mineral Province of Carajás, TO.

- Revista Brasileira de Geofísica 28, 411–426. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300007>
- CPRM, 1978. Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul: Relatório Final Fase de Processamento de Dados. Serviço Geológico do Brasil. Rio de Janeiro: CPRM. 48p. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/8583?show=full>.
- CPRM, 2006. Atlas Pluviométrico do Brasil. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em <https://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>.
- CPRM, 2011. Projeto Aerogeofísico Paraná - Santa Catarina. Serviço Geológico do Brasil. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Texto técnico - Volume I. Lasa Prospecções S.A. 88p. <http://geosgb.cprm.gov.br>.
- De Souza I.V.F., De Lucena L.R.F., Bezerra F.H.R., Filho J.B.D., 2019. Use of hydrogeophysical data to determine the role of faults in the geometry of the Barreiras Aquifer, Brazil. Brazilian Journal of Geology 49. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920170141>
- Dessart R.L., Reginato P.A.R., Gomes C.H., Gomes De Lima J.G., 2020. Análise da compartimentação estrutural do sistema aquífero embasamento cristalino no município de Bagé (RS) com base no uso de lineamentos (SRTM e magnéticos) e de dados hidrogeológicos. Águas Subterrâneas 34, 1–13. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29557>
- Diniz J.A.O., Monteiro A.B., Silva R. de C. da, Paula T.L.F. de, 2014. Manual de Cartografia Hidrogeológica. CPRM 124p.
- Domenico P.A., Schwartz F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology. Physical and Chemical Hydrogeology.
- Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demetrio J.G.A., 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações, 3rd ed, CPRM. Revisado e ampliado, Rio de Janeiro: CPRM. 812p. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/14818>.
- Fernandes A.J., 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista Do Instituto Geológico. <https://doi.org/10.5935/0100-929x.20080005>
- Fernandes A.J., 1997. Tectônica Cenozóica na Porção Média da Bacia do Rio Piracaia e sua Aplicação à Hidrogeologia. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. 244p. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-30092013-163243/>. <https://doi.org/10.11606/T.44.1997.tde-30092013-163243>
- Fernandes A.J., Amaral G., 2002. Cenozoic tectonic events at the border of the Paraná Basin,

- São Paulo, Brazil. Journal of South American Earth Sciences 14. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00078-5)
- Fernandes A.J., Fiume B., Bertolo R., Hirata R.C.A., 2016. Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). Geologia USP - Serie Científica. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i3p71-88>
- Fernandes A.J., Maldaner C.H., Rouleau A., 2011. Análise das Fraturas nos Basaltos de Ribeirão Preto, SP: Aplicação à Elaboração de Modelo Hidrogeológico Conceitual. Geologia USP - Serie Científica. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2011000300003>
- Fernandes A.J., Perrotta M.M., Salvador E.D., Azevedo S.G. de, Filho A.G., Stefani F.L., Paulon N., 2005. Aquíferos Fraturados. In: G. Rocha, A.J. Fernandes, M. Mancuso (Ed) Mapa de Águas Subterrâneas Do Estado de São Paulo Em 1:1.000.000. Nota Explicativa, DAEE/IG-SMA/IPT/CPRM, 66-84 P.
- Fernandes A.J., Perrotta M.M., Salvador E.D., Azevedo S.G., Gimenez Filho A., Paulon N., 2007. Potencial dos aquíferos fraturados do estado de São Paulo: condicionantes geológicos. Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v21i1.16168>
- Fernandes A.J., Rudolph D.L., 2001. The influence of cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: A case study in Sao Paulo, Brazil. Hydrogeology Journal 9, 151–167. <https://doi.org/10.1007/s100400000103>
- Ferrari A.L., 2001. Evolução Tectônica do Gráben da Guanabara. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 412 p. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-29082013-152530/pt-br.php>.
- Fossen H., 2016. Structural geology.
- Freeze R.A., Cherry J.A., 1979. Groundwater. Second Edition. Englewood Cliffs, N.j, Prentice-Hall, 604 p.
- Freitas R.C. de, 2005. Análise estrutural multitemática do sistema petrolífero Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 116 p. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/2461>.
- Friedel M.J., de Souza Filho O.A., Iwashita F., Silva A.M., Yoshinaga S., 2012. Data-driven modeling for groundwater exploration in fractured crystalline terrain, northeast Brazil. Hydrogeology Journal. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0855-1>
- Geosoft, 2009. Filtragem montaj MAGMAP. Processamento de dados de campos potenciais no domínio da frequência. Extensão para o Oasis montaj v.7.1. Tutorial e guia do Usuário. 83p.

- Geosoft, 2014. Oasis montaj How-to Guide. Oasis Montaj How-To Guide 1–21.
- Gleeson T., Novakowski K., 2009. Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow: Lineaments in the Canadian shield. *Bulletin of the Geological Society of America* 121, 333–347. <https://doi.org/10.1130/B26241.1>
- Grohmann C.H., Campanha G. a., 2010. OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis, 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec. Software disponível em <http://sites.igc.usp.br/openstereo/download/>. Acessado em setembro de 2019.
- Guimarães G.B., 2000. As rochas granitóides do Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná: aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos e mineralógicos. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-29102015-111937>
- Heilbron M., Valeriano C.M., Tassinari C.C.G., Almeida J., Tupinambá M., Siga O., Trouw R., 2008. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. Geological Society, London, Special Publications. <https://doi.org/10.1144/sp294.12>
- Isles D.J., Rankin L.R., 2013. Geological Interpretation of Aeromagnetic Data, Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>
- ITCG, 2008. Dados e informações geoespaciais temáticos. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Disponível em <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>.
- ITCG, 2006. Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Disponível em <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=55>.
- Kearey P., Brooks M., Hill I., 2002. An Introduction to Geophysics Explorations, Zoological Research. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623806>
- Licht O.A.B., 2001. A geoquímica multielementar na gestão ambiental identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no estado do Paraná, Brasil. Departamento de Geologia doutorado, 199.
- Lima F.M. de, Fernandes L.A., De Melo M.S., Góes A.M., Machado D.A.M., 2013. Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR). *Brazilian Journal of Geology* 43. <https://doi.org/10.5327/Z2317-48892013000100014>
- Maack R., 1947. Breves Notícias Sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina.

- Brazilian Archives of Biology and Technology, 2001, jubilee, 169–288.
<https://doi.org/10.1590/S1516-89132001000500010>
- Madrucci V., 2004. Prospecção de água subterrânea em terreno cristalino utilizando-se análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geofísico e técnicas de geoprocessamento, região de Lindóia, SP. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. 226p. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-27112015-112301/pt-br.php>, São Paulo.
- Madrucci V., 2003. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências 33, 43–52.
- Madrucci V., Taioli F., de Araújo C.C., 2008. Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. Journal of Hydrology 357, 153–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.026>
- Magalhães L.A., Souza Filho C.R., 2012. Targeting of Gold Deposits in Amazonian Exploration Frontiers using Knowledge- and Data-Driven Spatial Modeling of Geophysical, Geochemical, and Geological Data. Surveys in Geophysics 33. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9151-1>
- Martins A.M., Capucci E., Caetano L.C., Cardoso G., Barreto A.B.C., Monsorens A.L.M., Leal A.S., Vianna P., 2006. Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro, Síntese do estágio atual do conhecimento. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 1, 2, 12–14.
- Miller H.G., Singh V., 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
- Milligan P.R., Gunn P.J., 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics.
- MINEROPAR, 2006. Mapa geológico do estado do Paraná. Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR). Escala 1:650.000. Disponível em <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=154>. Acessado em Setembro de 2019.
- Ndatuwong L.G., Yadav G.S., 2014. Integration of Hydrogeological Factors for Identification of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing and GIS Techniques. Journal of Geosciences and Geomatics 2, 11–16. <https://doi.org/DOI:10.12691/jgg-2-1-2>
- Neves M.A., Morales N., 2007a. Structural control over well productivity in the Jundiá River Catchment, Southeastern Brazil. Anais Da Academia Brasileira de Ciencias. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652007000200012>

- Neves M.A., Morales N., 2007b. Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0112-6>
- O'Leary D.W., Friedman J.D., 1978. Towards a workable lineament symbology. *Proceedings of the third international Conference on the new basement tectonics*, Basement Tectonics Committee Publication #3, Basement Tectonic Committee, Inc., Denver, Colorado, 29–31.
- O'Leary D.W., Friedman J.D., Pohn H.A., 1976. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Bulletin of the Geological Society of America*. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2)
- Oliveira L.C. De, Oliveira R.M.A.G. De, Pereira E., 2018. Possible neotectonic control over the Southern Coast Cliffs of the Bahia State. *Anuario Do Instituto de Geociencias* 41. https://doi.org/10.11137/2018_3_702_716
- Oliveira N.C. de M., Bacellar L.D.A.P., Fiume B., Barella C.F., Nola I.T. de S., 2020. Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas* 34, 90–102. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29769>
- Passarelli C.R., Basei M.A.S., Siga O., Harara O.M.M., 2018. The Luis Alves and Curitiba Terranes: Continental Fragments in the Adamastor Ocean. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68920-3_8
- Patias D., Cury L.F., Siga O., 2019. Transpressional deformation during Ediacaran accretion of the Paranaguá Terrane, southernmost Ribeira Belt, Western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences* 96. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102374>
- Pinéo T.R.G., 2005. Integração de dados geofísicos, geológicos e de sensores remotos aplicados à prospecção de água subterrânea em meio fissural: distrito de Juá, Irauçuba, CE. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. 126 p. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/260>.
- Prazeres Filho H.J. dos, 2005. Caracterização Geológica e Petrogenética do Batolito Granítico Três Córregos (PR-SP): Geoquímica Isotópica (Nd–Sr–Pb), Idades (ID-TIMS/SHRIMP) e O18 em Zircão. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Price N.J., 1959. Mechanics of Jointing in Rocks. *Geological Magazine* 96. <https://doi.org/10.1017/S0016756800060040>
- Queiroz G.L., Salamuni E., Do Nascimento E.R., 2014. AzimuthFinder: Ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural., *Geologia USP - Serie Científica*. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400010005>

- Ramsay J.G.,Graham R.H., 1970. Strain variation in shear belts. Canadian Journal of Earth Sciences. <https://doi.org/10.1139/e70-078>
- Rivas R.S.Z.,Salamuni E.,Figueira I.F.R., 2019. Análise estrutural rúptil na zona de influência do arco de ponta grossa: estudo de caso na área da UHE-Mauá-PR. Geosciences = Geociências 38, 853–869.
- Ruhland M., 1973. Méthode d'étude de la fracturation naturelle des roches associée à divers modèles structuraux. Sciences Géologiques. Bulletin 26, 91–113. <https://doi.org/10.3406/sgeol.1973.1428>
- Salamuni E., 1998. Tectônica Da Bacia Sedimentar De Curitiba (Pr). Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Unesp.
- Salamuni E.,Ebert H.D.,da Silva Borges M.,Hasui Y.,Costa J.B.S.,Salamuni R., 2003. Tectonics and sedimentation in the Curitiba Basin, south of Brazil. Journal of South American Earth Sciences. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00013-0)
- Siga Junior O.,Basei M.A.S.,Reis Neto J.M.,Machiavelli A.,Harara O.M., 1995. O Complexo Atuba: um cinturao paleoproterozoico intensamente retrabalhado no Neoproterozoico. Boletim IG - Universidade de Sao Paulo, Instituto de Goeciencias.
- Siga Júnior O.,Basei M.A.S.,Sato K.,Citroni S.B.,Reis Neto J.M. dos,Weber W.,Lima P.S.,Sproesser W.M., 1999. Post-orogenic magmatism and sedimentation in neoproterozoic extensional regimes in the Brazilian southern region., South American Symposium on Isotope Geology.
- Siga Júnior O.,Cury L.F.,Harara O.M.,Ribeiro L.M. de A.L.,Basei M.A.S.,Prazeres Filho H.J. dos,Sato K.,Passarelli C.R., 2005. Evidências de regimes extensionais do estateriano no leste paranaens, com base em estudos geocronológicos U-Pb (zircão)., Simposio Nacional de Estudos Tectônicos.
- Siga O.,Basei M.A.S.,Passarelli C.R.,Sato K.,Cury L.F.,McReath I., 2009. Lower and Upper Neoproterozoic magmatic records in Itaiacoca Belt (Paraná-Brazil): Zircon ages and lithostratigraphy studies. Gondwana Research. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.11.002>
- Siqueira L., 1967. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. Rev. Água Subterrânea, Recife, 2 (9): 1-29.
- Souza Filho O.A. de, 2008. Airborne geophysical and geological data applied to the selection of groundwater potential areas in crystalline rocks of Ceará, Brazil. PhD. Thesis, Geosciences Institute, State Campinas State University, 149p. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/287416>.
- Souza Filho O.A. de,Franzini A., 2015. Mapa Hidrogeológico do Estado do Paraná.

- Spector A., Grant F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*.
<https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- Srivastava P.K., Bhattacharya A.K., 2006. Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: a case study from a hard rock terrain. *International Journal of Remote Sensing* 27, 4599–4620.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431160600554983>
- Struckmeier W.F., Margat J., 1995. Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. Hannover: International Association of Hydrogeologists, 177 p. (International Contributions to Hydrogeology, 17).
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., 1990. Telford - Applied Geophysics, Book.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- Tirén S., 2010. Lineament interpretation Short review and methodology. 42 (1), 35.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization - UNESCO, 1983. International Legend for Hydrogeological Maps, revised version.
- United States Geological Survey - USGS, 2018. Imagens do sensor Space Borne Thermal Emission and Reflection - ASTER. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em maio de 2018.
- Vasconcelos D.L., 2018. Reativações rúpteis de zonas de cisalhamento Pré-cambrianas na margem continental atlântica: bacias Sergipe-Alagoas e Pernambuco. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 150 p.
<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26394>.
- Weihermann J.D., Ferreira F.J.F., Oliveira S.P., Cury L.F., de Souza J., 2018. Magnetic interpretation of the Paranaguá Terrane, southern Brazil by signum transform. *Journal of Applied Geophysics* 154. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.05.001>
- Zalán P.V., Oliveira J.A.B. de, 2005. Origem e evolução do Sistema de Rifos Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências Da Petrobras* 13, 269–300.